

Etat de l'art

I. Le soudage

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage, désignant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure, désignant alors le joint par lui même.

Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue le soudage autogène du brasage, ainsi que le métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont « *les pièces à assembler participent à la construction du joint* » du brasage dont « *la constitution du joint est réalisé par l'intervention du seul métal d'apport* » [Sou 1]. Trois techniques d'assemblages peuvent être ainsi clairement définies :

Le soudage : opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé¹.

Le brasage : opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.

Le soudobrasage : technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

Le brasage et le soudobrasage cherchent à bénéficier des effets de mouillage du métal d'apport sur les pièces. Nous verrons que de tels effets existent en soudage mais sont préjudiciables à la morphologie optimale des joints soudés et ne sont pas systématiquement recherchés.

Nous nous contenterons ici de présenter les différentes techniques de soudage, par le biais des sources thermiques, en détaillant particulièrement le procédé TIG (Tungstene Inert Gas) qui fait l'objet de cette étude.

Nous porterons un intérêt tout particulier à la formation du bain de fusion, aux différentes actions internes et externes au volume fondu qui régissent la morphologie finale du cordon, et notamment les effets de quelques micro-éléments d'alliages sur la soudabilité. Nous serons alors amené à décrire les origines et les conséquences des courants surfaciques thermo-capillaires autrement appelés courants de Marangoni.

Mais présentons tout d'abord les grandes familles de techniques de soudage.

¹ Il est à noter que cette définition du soudage ne peut pas s'appliquer aux techniques de soudures en phase solide.

I.1. Généralités

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la Figure I.1.

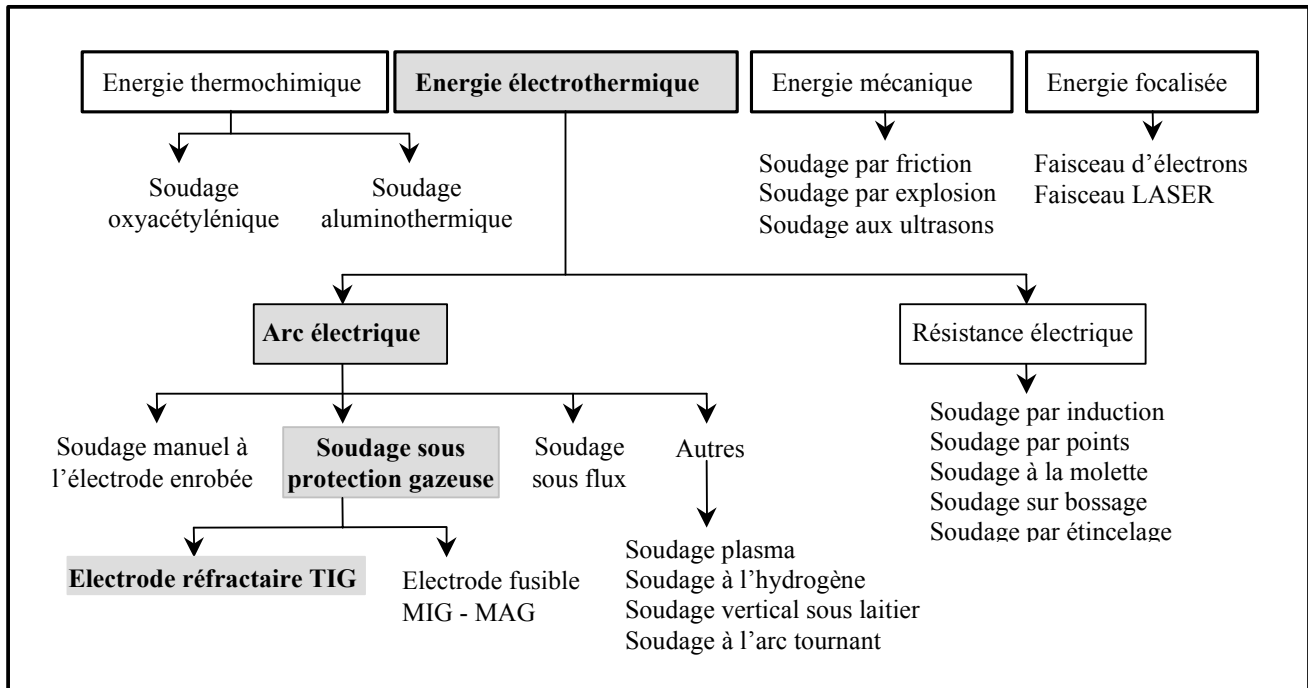


Figure I.1: Classification des procédés de soudage [Sou 2]

La conséquence directe de cette classification est la comparaison des énergies des différentes sources. Notons qu'il est préférable d'utiliser la notion d'énergie spécifique (énergie par unité de surface) pour comparer les différents procédés entre eux (cf. Figure I.2).

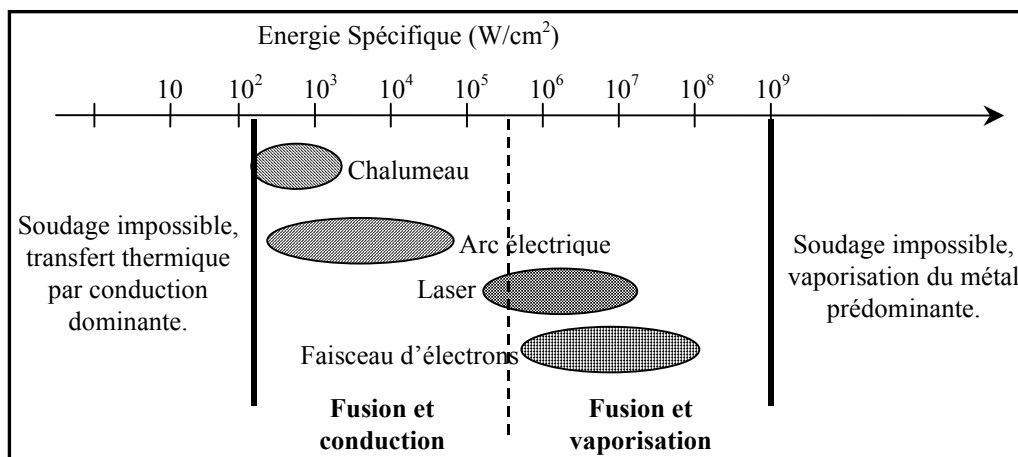


Figure I.2 : Sources thermiques et densités d'énergies

Il ressort alors que les procédés à l'arc électrique ont des densités d'énergie moyennes et que leur rendement va varier suivant que l'on ait ou non transfert de métal. En effet, ce dernier facteur va nettement conditionner le rendement d'arc mais surtout le taux de dépôt de métal

qui est un des critères de production important dans le choix du procédé pour une réalisation donnée.

Le Tableau I.1 complète ce rapide aperçu, rappelant les paramètres opératoires des différents procédés en comparant des grandeurs caractéristiques de la productivité de ces procédés (vitesse de soudage, pénétration accessible en une seule passe et taux de dépôt de métal) pour les aciers au carbone type E24.

Procédé de soudage	Vitesse cm/min	Pénétration	Taux de dépôt kg/h	Densité de courants A/mm ²
Chalumeau	10	5mm	< 1	--
Electrode enrobée	50-100	5mm	ordinaire : 1 - 3 haut rendement : 6 - 8	10 - 20
MIG-MAG	50-100	4mm	Fil nu : 5 - 9 Fil fourré : 5 - 12	200 300
Soudure sous flux	50 - 300	15mm	5 - 18	40 - 100
Soudure sous laitier	--	20mm	Jusqu'à 25	100
TIG	10-50	4mm	< 1	20 - 50
Plasma	20 - 50	8mm	< 1	--
Laser	100-500	10mm (6kW)	--	--
F.E.	100-10000	80mm (25kW)	--	--

Tableau I.1: Comparaison des différents procédés de soudage

I.2. Le soudage TIG

La présente étude vise à améliorer les capacités opératoires du procédé TIG. *Ce procédé se caractérise par la création d'un arc électrique dans une veine de gaz inerte.* L'électrode réfractaire en tungstène peut contenir des éléments d'addition comme le thorium ou l'yttrium qui favorisent l'émission électronique. L'arc et le bain fondu sont protégés de l'atmosphère ambiante par l'utilisation d'un gaz neutre. L'argon est le gaz le plus couramment utilisé mais il peut être parfois mélangé avec de l'hélium ou de l'hydrogène pour améliorer la soudabilité. L'électrode n'est pas fusible et ce procédé peut s'appliquer avec ou sans métal d'apport.

Le matériel nécessaire pour réaliser des soudures TIG est relativement simple, et peut être décomposé suivant trois fonctions :

- Générateur de courant : la source électrique délivre un courant continu lisse, continu pulsé ou alternatif. La plage d'intensités s'étend de quelques ampères à plus de 400A pour les postes automatisés. La tension de soudage varie de 8 à 30V. Toute l'électronique de commande du cycle de soudage (temporisation avant et après soudage, amorçage haute fréquence, dispositif de stabilisation d'arc, rampe de montée ou d'évanouissement d'arc, fréquence et intensité des pulsations) est intégrée dans la source et le cycle est programmé via un pupitre de commande.
- Arc électrique : réalisé en bout de la torche de soudage, cette dernière est composée d'une électrode de tungstène, d'une buse céramique canalisant le flux de gaz neutre et d'une gâchette utilisable en soudage manuel pour commander l'arc. La torche peut être refroidie par un circuit fermé de fluide caloporteur (cf. Figure I.3).
- Protection de l'électrode : le système de protection gazeuse est incorporé à la torche pour protéger l'arc et le bain. Bien souvent, l'utilisation de traînard de protection, endroit ou envers, vient garantir l'intégrité métallurgique du matériau au cours de son

refroidissement (notamment dans le cas de matériaux très sensibles à la pollution gazeuse comme le titane ou ses alliages).

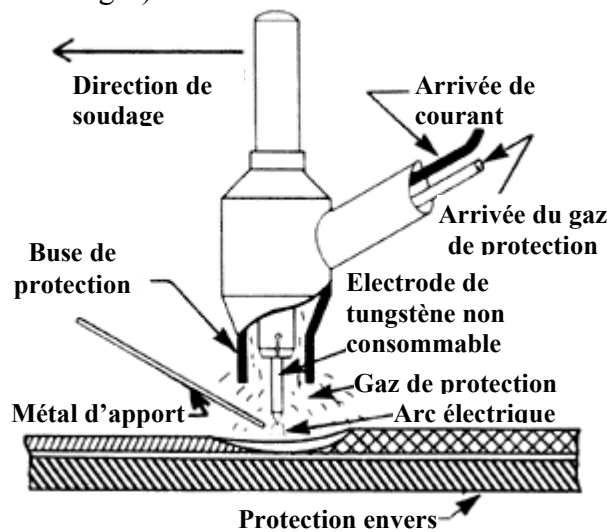


Figure I.3 : Torche TIG

Ce procédé peut être aisément automatisé ; on trouve alors soit un banc de soudage qui permet d'effectuer des soudures rectilignes ou orbitales avec ou sans système d'amenée de métal d'apport, soit un robot articulé qui permet d'effectuer des trajectoires plus complexes.

Le soudage TIG assure l'intégrité de la zone fondue de part sa protection gazeuse. L'absence de transfert de métal dans l'arc assure un comportement d'arc et de bain très stable qui garantit des cordons optimaux, lisses en endroit et en envers, exempts de défauts tels que les caniveaux, les morsures ou les projections de métal. Il est donc très souvent utilisé pour des matériaux dont le risque de pollution atmosphérique est important comme les alliages de titane, de nickel ou le zirconium, ou bien pour des applications qui requièrent une grande qualité de joint comme dans les industries agroalimentaires, pétrochimiques, nucléaires, aéronautiques et aérospatiales. De plus, pour éviter l'oxydation du métal et des zones thermiquement affectées en cours de refroidissement, on utilise des systèmes de protection du cordon endroit et envers par traînards qui servent à confiner sous atmosphère neutre les zones sensibles. On cherche donc à assurer une intégrité chimique optimale du matériau après soudure.

Cependant, les soudures TIG souffrent d'une faible pénétration de bain accessible en une seule passe. En effet, l'arc diffus, l'absence de transfert de métal entre l'électrode et la pièce, le comportement mouillant du métal fondu, conduisent à la formation de bains de fusion qui sont larges et peu pénétrés. En conséquences, les assemblages d'épaisseurs supérieures à 3mm nécessitent, pour les aciers inoxydables, le zirconium, les alliages de titane et de nickel, des usinages des bords à souder (chanfreins) ainsi que la réalisation avec métal d'apport de passes successives pour venir combler le joint.

Outre les risques cumulés de défauts, le faible taux de dépôt du soudage TIG ne peut rendre ce procédé compétitif par rapport à d'autres procédés à l'arc comme le MIG. Rendre le soudage TIG plus concurrentiel passe inévitablement par une augmentation des épaisseurs soudables en une seule passe et donc l'évolution de la technique actuelle par le biais de nouvelles conceptions de torches, d'électrodes ou l'utilisation de flux solides activants.

I.3. Formation du bain de fusion

L'étude du soudage TIG (source thermique et comportement de bain) est fondamentale pour les autres procédés à l'arc car l'absence de transfert de métal facilite l'interprétation et la modélisation (s'il y a lieu) des phénomènes intervenant dans l'arc et dans le bain liquide. En effet, au cours du soudage, un arc électrique jaillit entre l'électrode non fusible de tungstène et la pièce à souder. Il se crée alors un bain de métal fondu dont la morphologie (volume fondu, pénétration et largeur) est conditionnée par de nombreux paramètres que nous pouvons regrouper en deux catégories :

- Influence sur l'énergie incidente :
 - répartition spatiale de l'énergie dans l'arc,
 - pression d'arc,
 - rendement d'arc.
- Influence sur la convection du métal liquide :
 - présence d'éléments tensioactifs,
 - viscosité du métal liquide,
 - cisaillement aérodynamique,
 - effets de Lorentz.

L'ensemble des paramètres régissant l'arc et le bain de fusion sont nombreux et complexes. Il est impossible de les dissocier les uns des autres et de les modifier de manière indépendante afin de comprendre leurs effets.

Nous commencerons donc par présenter la source thermique TIG, c'est-à-dire l'arc électrique initié entre l'électrode de tungstène et la pièce, nécessaire à la fusion du bain. Puis, après avoir défini quelles géométries de cordons sont recherchées, nous analyserons l'ensemble des forces qui s'exercent sur et au sein du bain, leurs origines et leurs effets sur la morphologie fondue. Nous porterons une attention toute particulière aux mécanismes de tension de surface conduisant à la création de courants thermo-capillaires ou courants de Marangoni. Enfin, nous verrons dans quelle mesure le gaz de protection peut affecter la formation du bain de fusion.

I.3.1. L'arc électrique

L'arc électrique est un passage de flux d'électrons d'une cathode à une anode initié par une différence de potentiel entre une électrode de tungstène (généralement la cathode) et la pièce à souder. Il est confiné dans un gaz neutre qui va limiter la formation de plasma d'arc.

On distingue classiquement trois zones dans l'arc électrique qui sont la chute anodique, la chute cathodique et la colonne d'arc (cf. Figure I.4).

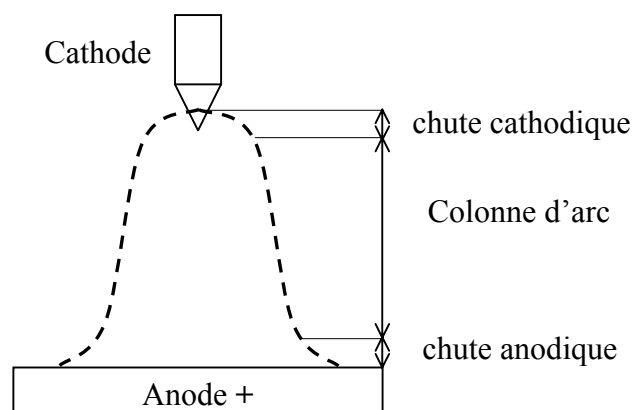


Figure I.4 : Arc électrique [Sou 4]

L'anode et la cathode ont des caractéristiques similaires par plusieurs aspects. Elles présentent toutes les deux une chute de tension qui a lieu sur de très courtes distances conduisant à des champs électriques localement très importants (pouvant atteindre 10^9 V/m à la cathode contre 10^3 V/m dans la colonne d'arc). Ces zones appelées tache anodique et tache cathodique sont caractérisées par une contraction de l'arc aux deux pôles. Elles sont nécessaires à la stabilité de l'arc électrique. Les énergies mises en jeu dans ces régions vont conditionner la qualité de l'arc ainsi que la célérité des électrons émis. Les densités de courant au sein de la colonne ionisée sont proches de 10^6 à 10^7 A/m² alors qu'elles sont de 10^8 à 10^9 A/m² pour l'anode et peuvent atteindre des valeurs encore supérieures pour la cathode [Sou 3].

Nous allons revenir sur chacune de ces trois zones pour comprendre les principes qui régissent le transfert des électrons [Sou 4].

I.3.1.a. La cathode

C'est la zone d'émission des électrons qui peut se faire selon deux modes distincts appelés émission thermoïonique ou émission non thermoïonique (autrement nommée cathode froide).

- L'émission thermoïonique est la conséquence de l'échauffement de la cathode par effet Joule. A l'extrémité de la cathode, l'énergie des électrons dépasse la fonction de travail de l'électron (énergie nécessaire pour arracher un électron). Ce mode d'émission est caractéristique d'une polarité directe (l'électrode est la cathode et la pièce l'anode). Pour les électrodes en tungstène pur, il faut atteindre la fusion du tungstène pour obtenir une émission thermoïonique. La pointe de l'électrode devient alors hémisphérique et stabilise l'arc par une émission uniforme sur la surface. Des oxydes de thorium (ThO₂), de zirconium (ZrO₂) ou de cérium (CeO₂) sont ajoutés au tungstène pour profiter de leur plus forte émissivité à faible température évitant la fusion de la pointe d'électrode. Ces électrodes sont affûtées en cône pour concentrer l'émission thermoïonique et limiter la tache cathodique. Il se crée ainsi une charge spatiale (ou nuage d'électrons) qui va pouvoir transiter vers une autre électrode à plus fort potentiel (dans notre cas la pièce à souder).
- L'émission non thermoïonique crée un arc dont le champ électrique est très intense (dépassant 10^9 V/m). Ce champ très intense arrache les électrons de la cathode « froide ». Cette méthode s'applique en polarité inverse (la pièce joue le rôle de cathode et l'électrode celui d'anode). Elle est favorisée par la présence d'une fine couche d'oxydes toujours présente sur la pièce. Avec ce mode d'émission, l'arc est plus instable et il apparaît de petits jets de vapeurs métalliques. Cette configuration est utilisée quand l'on favorise le décapage et que l'on minimise l'apport thermique à la pièce, au détriment d'une morphologie de bain et de la régularité du cordon.

I.3.1.b. L'anode

Les paramètres électriques (intensité, tension) contrôlent la décharge électrique à la cathode. En revanche, le flot d'électrons pénètre dans l'anode par la tache anodique avec une certaine densité de courant qui va déterminer la géométrie du bain. Cette densité d'énergie ne peut être contrôlée qu'indirectement à partir de la cathode. La stabilité de la tache anodique dépend en majeure partie du gaz d'assistance, du matériau à souder et de la géométrie de soudage.

La densité de courant au droit de la tâche anodique est gaussienne, sa largeur sera fonction du gaz d'assistance utilisé (argon ou hélium), de la géométrie d'électrode (type d'affûtage et conicité d'électrode) et des paramètres opératoires (intensité et tension d'arc, vitesse de soudage, longueur d'arc).

Pour ce qui est du rendement d'arc mesuré, il varie de 50 à 70%, suivant les paramètres utilisés. La tension d'arc et la nature de l'anode sont les principaux facteurs qui influent le rendement de l'arc.

I.3.1.c. La colonne d'arc

Le passage des électrons entre les électrodes ionise partiellement le gaz de protection sur son chemin, ce qui rend la colonne d'arc conductrice et crée un plasma d'arc. L'ensemble est électriquement neutre, composé d'atomes de gaz de protection, d'électrons (chargés négativement), d'ions gazeux (positifs) et certainement de vapeurs métalliques.

Bien que cette zone soit la plus importante et la plus facile à analyser, elle apporte peu d'informations sur l'optimisation ou le comportement du soudage TIG (encore que de fines analyses des vapeurs du plasma d'arc renseigneraient sur la présence d'éléments favorisant la soudabilité).

I.3.2. Morphologie de cordon recherchée

Il est important de connaître, dès maintenant, la géométrie optimale de soudure qui nous intéresse. Pour cela, l'analyse du volume fondu et principalement sa pénétration et sa largeur seront les critères retenus. De plus, les coulées (ou nuances) présentant des pénétrations plus élevées, pour des conditions opératoires identiques, seront préférées. En effet, elles vont favoriser la réalisation d'assemblages plus épais en un nombre limité de passes, ou permettre d'augmenter les vitesses de travail. A ces gains de productivité vont s'ajouter la diminution des quantités de chaleur nécessaires pour réaliser la soudure limitant ainsi les phénomènes de transformations structurales et leur étendue.

Il est d'usage de caractériser la morphologie du cordon par un coefficient défini de la façon suivante (cf. Figure I.5) :

- pour un cordon non débouchant, c'est le rapport entre la pénétration et la largeur du cordon fondu en endroit : P/L ,
- pour un cordon débouchant, ce coefficient tient compte de la largeur envers : $(e + L_v)/L_d$. L'équilibre du cordon est modifié, les forces de gravité jouent un rôle important sur l'aspect du cordon en envers (bourelet d'autant plus important que le volume fondu est grand). Il faut donc s'affranchir de ce facteur de position (effet de la gravité variant suivant le type de position de soudage). La largeur fondu en pied de cordon devient alors le paramètre géométrique utilisé, on la compare à la largeur fondu en endroit : L_v/L_d .

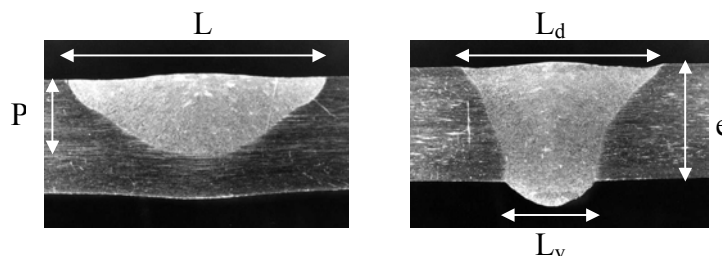


Figure I.5 : Critères d'efficacité de la soudure - soudure inox TIG (gauche) et ATIG (droite) [Sou 5]

Ce facteur caractérise donc la répartition géométrique du volume fondu.

En effet, si pour une même quantité d'énergie le ratio P/L est plus important, ceci est alors typique d'une augmentation de pénétration et/ou d'une diminution de la largeur endroit fondu.

Ce rapport n'est pas forcément inférieur à 1, par exemple, en soudage à haute densité d'énergie. Dans le cas du soudage TIG des aciers inoxydables à bas soufre, BURGARDT et HEIPLE ont déterminé que ce facteur géométrique avoisine les 0,2 alors que sous certaines conditions de dopage (soufre ou sélénium) et de paramètres opératoires, il peut atteindre 0,69 [Sou 6].

Dans le cas particulier de soudures débouchantes, on définit le rapport de la largeur envers sur la largeur endroit : L_v/L_d . Cet indice évolue de 0, soudure non débouchante, à 1 réalisant ainsi un cordon droit.

Il sera systématiquement recherché, au cours de cette étude, une amélioration de ce facteur d'efficacité en cherchant à obtenir un facteur de forme P/L le plus grand possible et pour les soudures débouchantes un L_v/L_d voisin de 1. En effet, le volume fondu et sa géométrie vont conditionner les déformations de la pièce soudée. On cherchera alors à symétriser les géométries de cordon pour compenser les déformations induites par le procédé de soudage (cf. Figure I.6).

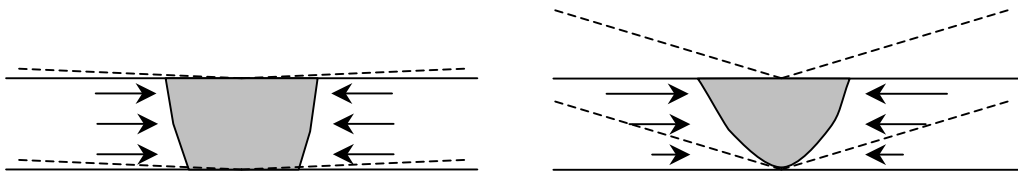


Figure I.6 : Déformations et morphologie de bain

Nous pouvons maintenant nous pencher sur l'influence de chaque force intervenant dans la création du bain fondu et leurs effets sur la morphologie du bain.

I.3.3. Comportement du bain liquide

La répartition de l'énergie dans l'arc TIG, puis son transfert dans la pièce constituent les deux éléments clés susceptibles de contrôler la géométrie du bain de fusion.

Alors que le premier élément est tributaire de l'environnement (gaz de protection, conicité d'électrode), le second est dépend de la nature du matériau. On peut identifier en étudiant les différents courants propres au bain de fusion ainsi que les effets de l'arc sur la surface du bain, quels vont être les facteurs qui vont favoriser la pénétration et ceux qui, au contraire, vont rendre le bain plus mouillant.

Le bain fondu est soumis à plusieurs forces présentées en Figure I.7. Par exemple, la gravité va surtout intervenir lors de soudures en position (verticale montant, verticale descendant, en corniche ou au plafond) ou lors de réalisations à pénétration débouchante. Les risques d'effondrement de bain sont fonction du volume de métal fondu et des forces de tension interfacielles en surface du métal fondu. D'autres forces hydrodynamiques sont communément répertoriées en soudage, elles comprennent des forces surfaciques telles que la pression d'arc, le cisaillement aérodynamique et les forces de tensions de surface et des forces internes au bain, forces de Lorentz et les forces de flottabilité. Chacune va agir différemment sur la géométrie du cordon fondu.

Ainsi, par exemple, les forces de Lorentz et les courants de tension de surface (dans le cas où leur gradient thermique est positif) sont pénétrants, a contrario des forces de flottabilité et des courants issus du cisaillement aérodynamique du gaz de protection.

Nous allons donc reprendre l'influence de chaque composante sur la morphologie finale du cordon soudé et nous nous attarderons tout particulièrement sur les courants de Marangoni issus des gradients spatiaux des valeurs de tension de surface.

Mais, afin de clarifier le vocabulaire utilisé ainsi que les paramètres importants dans l'analyse à venir des cordons, il nous faut définir les différents critères d'aspect ou paramètres morphologiques qui vont nous être utiles.

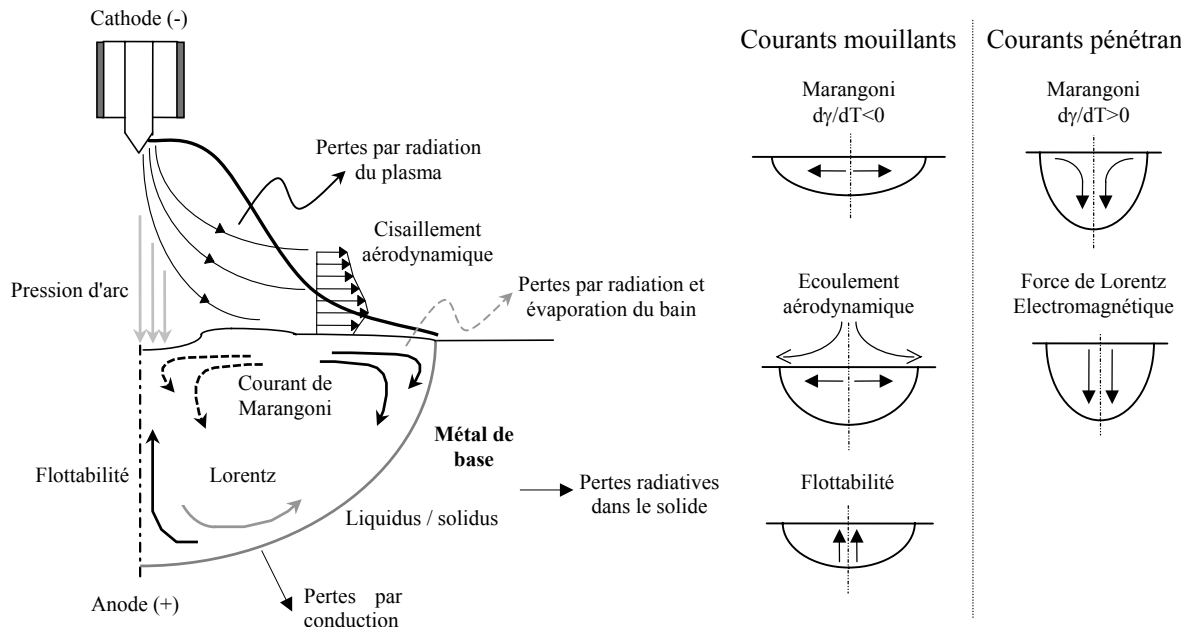


Figure I.7 : Les différents courants du bain de fusion [Sou 5 et 7]

I.3.3.a. La pression d'arc

La dépression d'arc en surface du bain, selon BURGARDT et HEIPLE, va favoriser la pénétration en diminuant l'épaisseur du film liquide. Celui-ci joue un rôle d'isolant face à la source thermique [Sou 6]. EROKHIN décrit la répartition de la pression d'arc par une loi gaussienne dont la valeur maximale est fonction du carré de l'intensité :

$$P_{(r)} = kI^2 e^{(-ar)} \quad \text{Équation I.1}$$

où k et a sont fonction de la longueur d'arc, du diamètre et de la géométrie de l'électrode [Sou 8]. Ceci est confirmé par ROKHLIN et al. [Sou 9] et par MENDEZ et al. [Sou 10] qui affinent le comportement en notant trois régimes d'activité :

- $I < 100A$: il n'y a pas de dépression bien que la pression statique de l'arc donne une force résultante de $0,5 \cdot 10^{-3}N$, mais la pénétration évolue rapidement avec l'intensité.
- $100A < I < 200A$: la dépression de bain est faible, insuffisante pour contrebalancer les forces de tension de surface qui tendent à s'opposer à la déformation de bain. La pénétration évolue peu ; le bain liquide joue alors un rôle d'isolant thermique entre la source et la pièce, les conditions thermiques ne sont pas favorables à une bonne pénétration.
- $I > 200A$: le bain se creuse nettement, il en résulte une augmentation de la pénétration proportionnelle au carré de l'intensité électrique. Pour $300A$, l'épaisseur de film résiduel est de $0,5mm$ avec une force résultante de $90 \cdot 10^{-3}N$. Cependant, bien que les fortes intensités favorisent la dépression du bain et la pénétration, elles peuvent aussi engendrer

des défauts (en vitesses de soudage élevées) dus à des instabilités de surface. Ceux-ci vont créer des cratères inadmissibles en soudage comme des cavités ou les défauts de Puckering comme le montrent MARYA et HASCOET [Sou 11-12].

I.3.3.b. Le cisaillement aérodynamique

Ce cisaillement est le résultat du passage du gaz de protection à la surface du bain. Il crée en surface des courants centrifuges qui vont élargir le bain et le rendre mouillant.

L'intensité de cet effet est fonction de la nature du gaz, de son débit et de la géométrie de la buse utilisée.

CHOO et al. ont modélisé le comportement surfacique du bain et obtiennent numériquement une diminution de température maximale au centre du bain de 3100°K à 3000°K (pour une intensité de 200A avec une longueur d'arc de 1,5mm) [Sou 13]. Ils ont calculé l'évolution des vitesses surfaciques maximales qui passent de 0,495m/s à 0,515m/s (dans un bain de fusion de 8mm de diamètre sous une intensité de 300A). Or, ceci n'est pas suffisant pour faire évoluer la morphologie du bain de manière significative.

Il ressort aussi de leurs études que tant que l'intensité reste inférieure à 300A, les effets des contraintes de cisaillement aérodynamiques sont négligeables face aux effets des variations de tension de surface. Leur modèle numérique intègre l'évaporation des éléments volatiles, mais postule que la surface libre du métal liquide reste plane sous l'effet de l'arc, ce qui, comme nous l'avons vu précédemment, ne s'avère plus vrai au delà de 300A.

I.3.3.c. Les forces de flottabilité

Les forces de flottabilité ou convection naturelle sont issues des gradients thermiques dans les fluides qui, en fait, provoquent des variations de masse volumique. Les champs de température au sein du bain conduisent, de plus, à des vitesses d'écoulement très réduites, de l'ordre de quelques millimètres par seconde. Ainsi ces effets sont très souvent négligés dans les modélisations.

I.3.3.d. Les forces de Lorentz

Pour ce qui est du champ magnétique induit par l'arc électrique, il est la source des forces de Lorentz intervenant au sein du métal fondu. Les courants résultants peuvent être importants, modifiant fortement la géométrie fondue obtenue. La célérité de convection dépend de l'intensité du champ magnétique et donc de l'intensité et de la densité de courant appliqué. Or, cette densité évolue fortement avec la hauteur d'arc et la géométrie d'électrode.

TSAI, à l'aide de modèles numériques incluant les déformations en surface du bain, évalue à 40cm/s les vitesses maximales atteintes par les courants de Lorentz dans le cas d'une source gaussienne, d'intensité 150A sur de l'aluminium [Sou 14].

FAUTRELLE, quant à lui, détermine des vitesses qui sont fonction de l'intensité de soudage : entre 60A et 100A, la variation est de 7,6mm/s à 80mm/s pour les aciers [Sou 15].

De plus, au delà de 250A, des courants de rotation peuvent apparaître dans le bain ; la pénétration se voit augmentée par le vortex créé de part l'effet conjoint des forces de Lorentz et de la déformation de la surface libre du métal fondu. Cependant, les surfaces résultantes présentent de nombreux défauts d'aspects et nécessitent une passe de finition, dite passe d'aspect, qui est une re-fusion superficielle de l'endroit du cordon.

Pourtant, l'utilisation de champs magnétiques externes ne permet pas de modifier les morphologies de bain, comme le rapportent BINARD et CHABENAT, mais permet de

stabiliser son comportement dans le cas d'arcs erratiques, ainsi que d'augmenter la vitesse critique d'apparition de soufflage d'arc [Sou 16].

I.3.3.e. Les courants thermo-capillaires

Au niveau de la vitesse des courants thermo-capillaires, que ce soit au travers de calculs (ZACHARIA et al. : 0,12m/s [Sou 17]), ou par des mesures de célérité en surface (HEIPLE et ROPER : 0,5m/s à 1,4m/s [Sou 18]), il apparaît clairement que ces courants peuvent expliquer bien des phénomènes de part leur importance. Aussi avons nous choisi de leur consacrer la partie suivante au cours de laquelle nous évoquerons non seulement leurs origines, mais aussi toute l'influence qu'ils peuvent avoir sur les soudures.

I.3.4. Microchimie et morphologie de bain - courants de Marangoni

En effet, HEIPLE et ROPER sont les premiers à suggérer l'influence prédominante des courants de Marangoni issus des modifications spatiales des tensions de surface [Sou 19]. Par dopage des nuances étudiées, ils mettent en évidence des courants de convection qui peuvent être centrifuges ou centripètes et qui vont conduire, s'ils sont suffisamment intenses, à des morphologies de bain radicalement différentes.

Afin de cerner l'influence de tels courants, rappelons tout d'abord leurs origines et la notion de tension de surface.

I.3.4.a. La tension de surface

C'est à la fin du XIX^e siècle que G.C.M.MARANGONI (1840-1925) a constaté et mis en évidence ce phénomène. Il avait remarqué les déplacements de gouttes de vin sur une surface d'eau et il relia ces mouvements à l'existence d'un gradient de tension de surface sur le liquide.

Mais qu'est ce que la tension surfacique ?

Elle caractérise un phénomène d'équilibre de particules en surface d'un fluide, comme, par exemple, la contraction d'une goutte de liquide sur une surface.

Une analyse microscopique du phénomène met en évidence le déséquilibre des particules à la surface libre du fluide.

Si on isole une particule en surface d'un fluide, elle est soumise à des forces électrostatiques (de la forme k/r^n) de la part des autres molécules du liquide et des molécules du gaz atmosphérique. Or, comme les distances intermoléculaires sont plus grandes dans le gaz que dans le liquide, les forces exercées par les molécules de gaz sont d'intensité plus faible que celles exercées par les molécules du liquide. La résultante globale des forces exercées sur la particule est alors dirigée vers l'intérieur du liquide. Cette force caractérise la tension superficielle du liquide (γ en N/m).

On définit aussi l'énergie libre de surface comme l'énergie requise pour augmenter la surface d'une unité (travail nécessaire pour amener en surface des particules initialement au repos au sein du fluide). Or, tout système tend à évoluer spontanément de façon à avoir une énergie libre minimum. Par conséquent, le liquide évolue spontanément de façon à minimiser sa surface libre. D'où, dans le cas du soudage, la surface du bain de fusion s'oppose à la déformation due à la poussée de l'arc.

Les valeurs de tension superficielle sont dépendantes de la température, mais aussi de la concentration en soluté. Il peut en résulter des migrations de particules des régions à faibles tension superficielle vers une région à forte tension superficielle.

Les deux moteurs des courants de Marangoni sont donc :

- la présence d'un gradient de température en surface,
- l'existence d'un gradient de concentration issu d'une hétérogénéité dans la distribution des impuretés au sein du liquide.

Dans le cas du soudage, il existe un incontournable gradient thermique. En effet, le bain de métal fondu est le siège d'une variation de température qui s'échelonne entre la température de fusion du métal sur les bords du bain et la température de vaporisation du métal au centre du bain. Cette variation de température, de l'ordre de 1300 à 1500°C, s'étale sur une demi largeur de bain de dimension typique égale à 1cm.

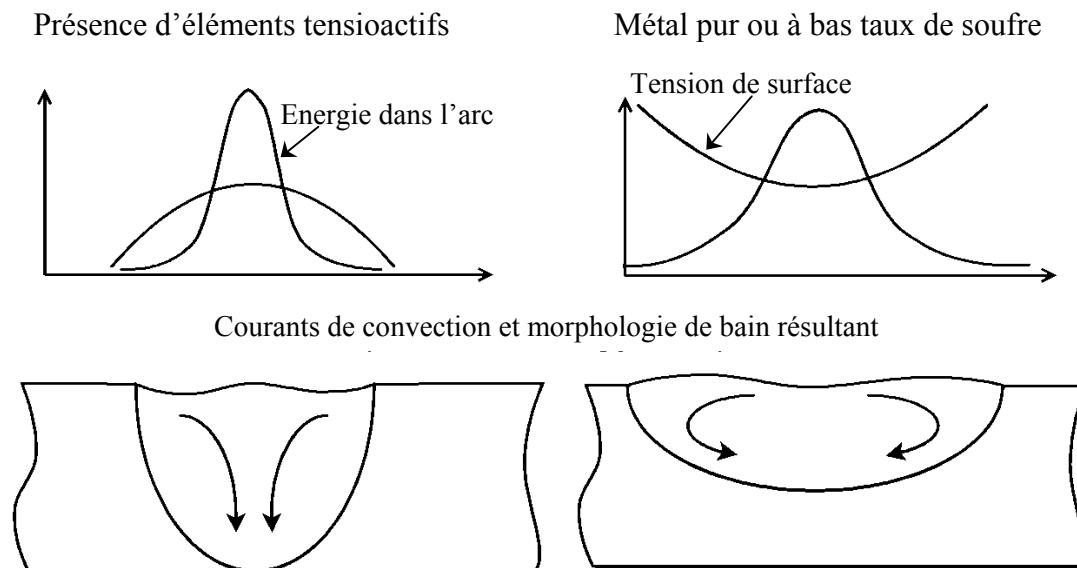


Figure I.8 : Tension de surface et courants de convection [Sou 19]

Suivant le signe du gradient thermique de tension de surface ($\partial\gamma/\partial T$ en $\text{Nm}^{-1}\text{K}^{-1}$), positif ou négatif, les courants induits affectant la géométrie du volume fondu seront respectivement centripètes ou centrifuges (cf. Figure I.8).

On associe alors volontiers une relation linéaire entre la valeur de la tension de surface et la température du liquide par :

$$\gamma_{(T)} = \gamma_{Tf} - \frac{\partial\gamma}{\partial T}(T - Tf) \quad \text{Équation I.2}$$

où γ_{Tf} est la tension de surface à la température de fusion Tf (cf. Tableau I.2).

Un soluté dont la tension superficielle propre est inférieure à celle du solvant est dit tensioactif. S'il migre en surface, il va abaisser la valeur de tension superficielle. Le gradient de tension de surface peut alors devenir positif, créant des courants de Marangoni centripètes.

Élément	Tf (°C)	γ (mNm ⁻¹)	$\partial\gamma/\partial T$ (Nm ⁻¹ K ⁻¹)
Fer	1540	1806	0,39
Aluminium	660	865	0,16
Titane	1660	1650	0,26
Chrome	1875	1910	0,32
Nickel	1450	1823	0,38
Zirconium	1850	1400	0,2
Magnésium	650	569	0,35
Soufre	116	58.6	0,08
Silicium	1410	720	0,13
Sodium	98	200	0,11
Sélénium	220	106	0,14
Calcium	847	361	0,1

Tableau I.2 : Tableau de tensions de surface et de leur gradient thermique

Or, l'effet tensioactif de certains éléments s'inverse au delà d'une température donnée. Cette température dépend essentiellement de la concentration en éléments tensioactifs et peut être exprimé comme suit :

$$\gamma_{(T)} = \gamma_{Tf} - \frac{\partial\gamma}{\partial T}(T - Tf) - RT\Gamma_s \ln \left[1 + ka_i \exp \frac{-\Delta H^\circ}{RT} \right] \quad \text{Équation I.3}$$

où γ_{Tf} est la tension de surface du métal pur à sa température de fusion Tf, T la température de la surface, Γ_s l'excès de concentration en soluté une fois la surface saturée, k un paramètre fonction de l'entropie de ségrégation, a_i l'activité de l'espèce i dans la solution et ΔH° est la chaleur d'absorption considérée comme indépendante de la température (cf. Figure I.9).

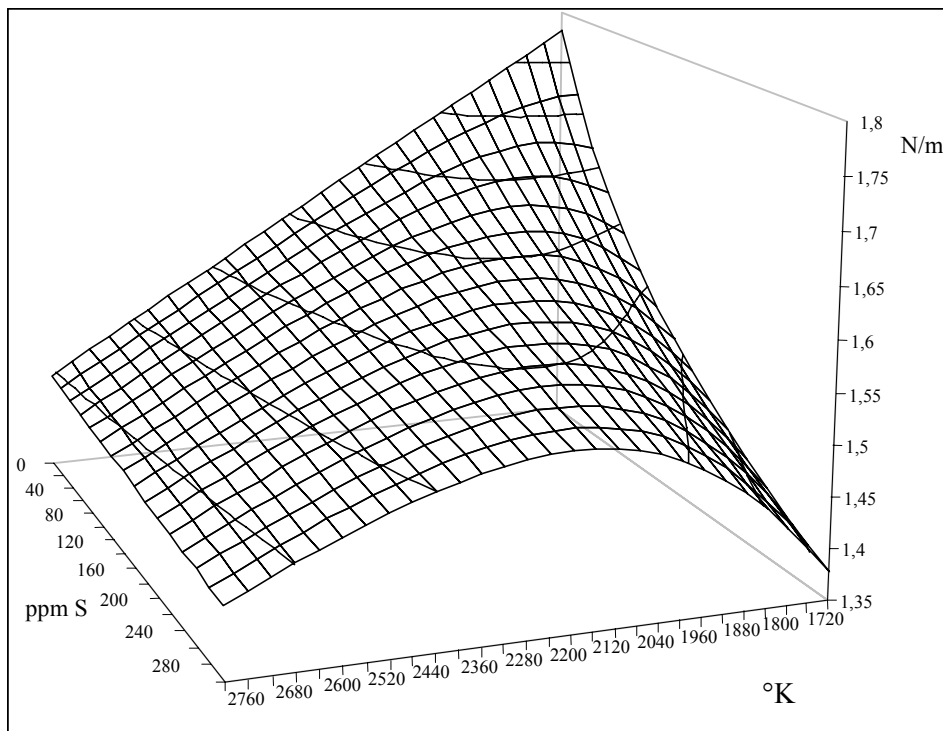


Figure I.9 : Tension superficielle du système Ni-S en fonction de la température [Sou 23]

Le gradient de tension de surface décroît avec l'augmentation de la température jusqu'à un seuil (variable suivant la concentration de l'élément tensioactif). Il existe pourtant une

concentration et une température critique au-delà desquelles le gradient thermique de tension de surface devient positif inversant le sens des écoulements de Marangoni.

On constate sur la Figure I.10 que cette température d'inversion augmente avec la concentration en soluté tensioactif. Dans le cas du soudage, les concentrations de soluté sont généralement fixes, l'augmentation de l'énergie (via l'intensité ou la vitesse) conduit à une apparition plus rapide de cette température critique. La figure I.11 illustre ce comportement, on obtient alors un bain au contour particulier qui rappelle les morphologies de bain en présence de courants de Lorentz importants (au delà de 200A - cf. Figure I.11).

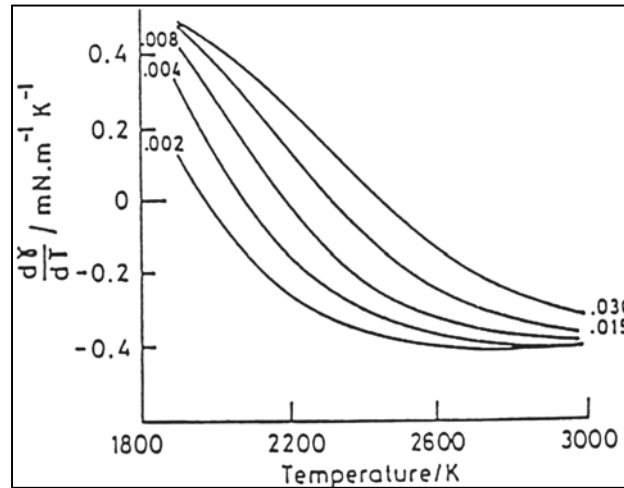


Figure I.10 : Evolution du gradient de tension de surface du couple Fe-S avec la température [Sou 23]

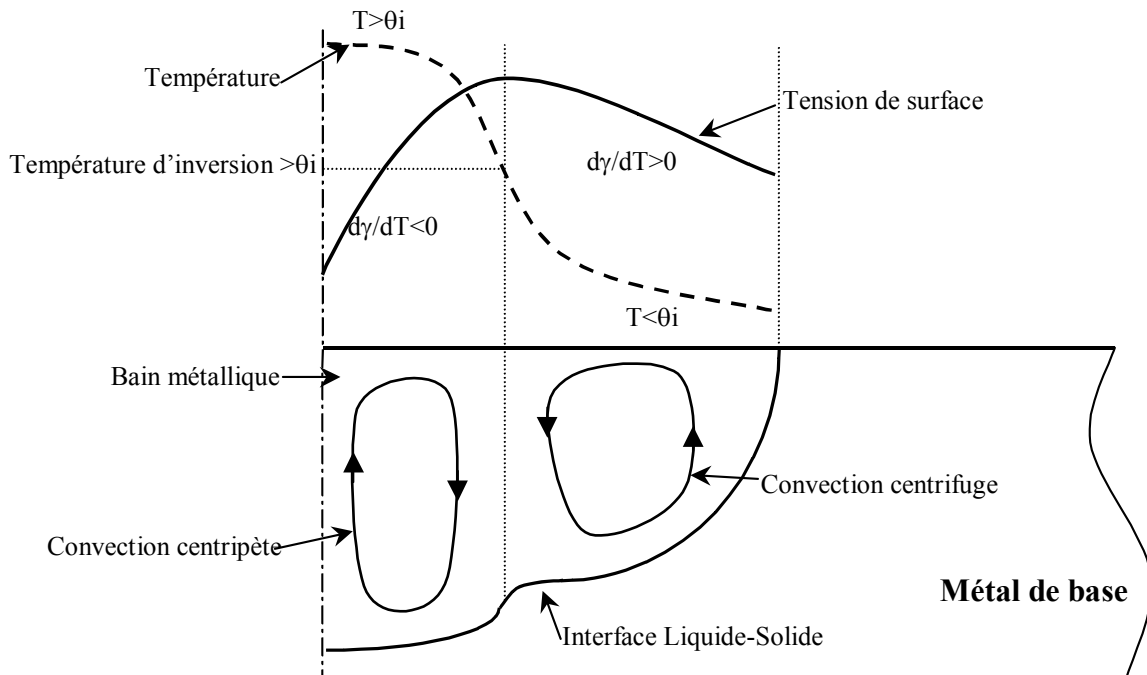


Figure I.11 : Inversion des courants de tension de surface

Toutes les études menées jusqu'alors dans le cadre du soudage ont mis en évidence que les apparitions de courants de Marangoni étaient intimement liées à la présence ou non d'impuretés chimiques dans le métal de base.

MILLS et KEENE définissent, dans le cas du soudage à l'arc, un nombre caractéristique des écoulements thermo-capillaires de Marangoni par :

$$Ma = \frac{d\gamma}{dT} \frac{dT}{dx} L^2 \mu \alpha \quad \text{Équation I.4}$$

où L caractérise la largeur caractéristique du bain, μ la viscosité dynamique du métal liquide et α le coefficient de diffusivité thermique du métal [Sou 20].

Ce nombre permet de caractériser les perturbations d'écoulement du bain métallique, notamment l'apparition d'oscillations et de déformations du bain [Sou 21]. Ainsi, les courants thermo-capillaires peuvent conduire à la formation de défauts de surface suite à de forts gradients thermiques ou de forts gradients de tension de surface. Ces deux phénomènes couplés, au cours du soudage ATIG, conduiront à des aspects endroits fortement perturbés et inacceptables en soudage.

I.3.4.b. Micro-chimie de bain

La tendance actuelle des aciéristes est de raffiner les matériaux ; c'est-à-dire d'éliminer ou de limiter les impuretés présentes dans les coulées. Par exemple, les teneurs en soufre qui avoisinaient les 0,02% il y a trente ans sont aujourd'hui limitées à 0.001% pour améliorer la ténacité et la résistance à la corrosion des aciers. Or, il se trouve que certaines de ces impuretés ont des effets tensioactifs et limiter leur teneur dans les coulées conduit à en diminuer la soudabilité. Ainsi, deux coulées de même nuance peuvent avoir des soudabilités complètement différentes (cf. Figure I.12).

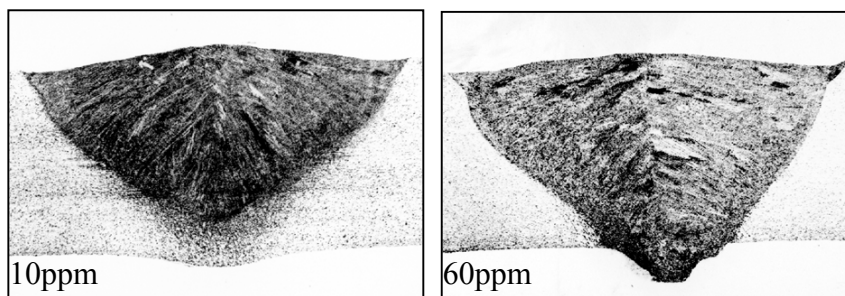


Figure I.12 : Effet du soufre sur la morphologie de bain d'un acier inoxydable austénitique 304 - 200A - 15cm/min (photo ECN x8)

De nombreuses études ont été menées pour comprendre ce phénomène puis identifier les différents éléments résiduels et leur influence sur la pénétration pour les aciers au carbone et les aciers inoxydables.

On a pu ainsi qualifier un certain nombre de micro-éléments qui peuvent être :

- des éléments tensioactifs : ils affectent le gradient de tension de surface et ont un rôle important dans la détermination de la morphologie du cordon,
- des éléments ayant une grande tension superficielle propre : ils n'abaissent pas la valeur de tension du solvant,
- des éléments ayant de fortes affinités chimiques avec des composés qu'ils peuvent piéger et ainsi réduire la quantité d'éléments tensioactifs en formant des composés stables.

L'analyse des valeurs de tension de surface des éléments permet de prévoir quels peuvent être les éléments actifs ou non, fonction du soluté (cf. Figure I.13).

Ainsi, dans le cas des aciers par exemple, le carbone semble être défavorable à la formation de courants de Marangoni centripètes de part sa très haute valeur de tension de surface. Or,

cette interprétation est abusive, il faut en effet comparer des valeurs de tension de surface à température identique.

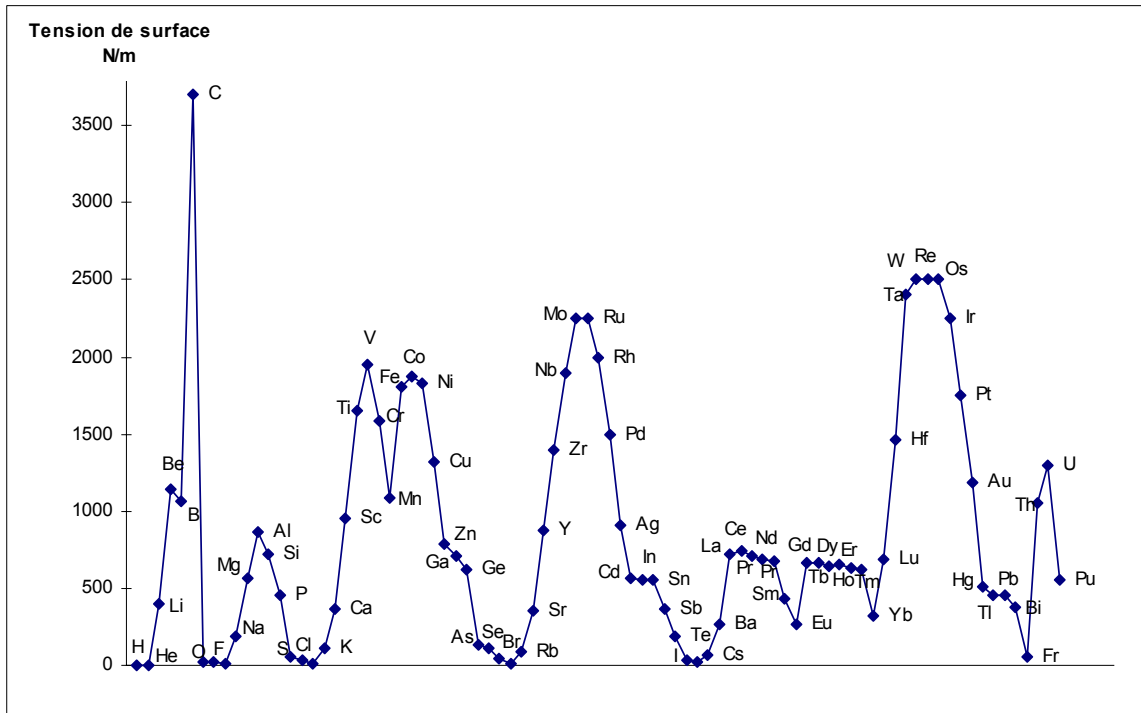


Figure I.13 : Valeur de tension de surface des éléments purs présentés à leur température de fusion par ordre croissant de numéro atomique [Sou 22]

Pour reprendre notre exemple, le carbone se liquéfie au delà de 4230°K alors que l'acier fond à partir de 1800°K, il est donc sans effet sur la tension de surface des aciers.

Nous allons, à présent, voir quels éléments présents dans les coulées jouent un rôle identifié à ce jour sur la soudabilité.

I.3.4.c. Les éléments tensioactifs des aciers

Un élément qualifié de tensioactif pour le soudage, est un élément capable de réduire la valeur de tension de surface du bain liquide et dont la présence dans le métal de base favorise la pénétration du bain de fusion au détriment d'une largeur importante. Détaillons maintenant les principaux composants identifiés.

- **Le soufre et le sélénium**

Le soufre et le sélénium sont clairement identifiés comme étant des composants fortement tensioactifs pour les aciers. Ils favorisent l'obtention de cordons étroits et profonds. L'indication d'une concentration limite au dessous de laquelle le rapport P/L est faible (bain mouillant) ou au contraire au dessus de laquelle ce rapport est grand (bain pénétrant) reste difficile à donner. En effet, les différentes études, si elles focalisent sur les teneurs en soufre ou en sélénium, n'intègrent pas toujours la présence d'autres micro-éléments qui peuvent favoriser ou, au contraire, déprécier la pénétration du cordon.

On peut cependant indiquer, qu'au delà de 70ppm de soufre, pour les nuances 304 et 316, le rapport P/L est grand et qu'il est faible pour les teneurs inférieures à 30ppm comment montrent les travaux de MILLS et al. [Sou 20] et de MARYA et OLSON [Sou 23] (cf. Figure I.14).

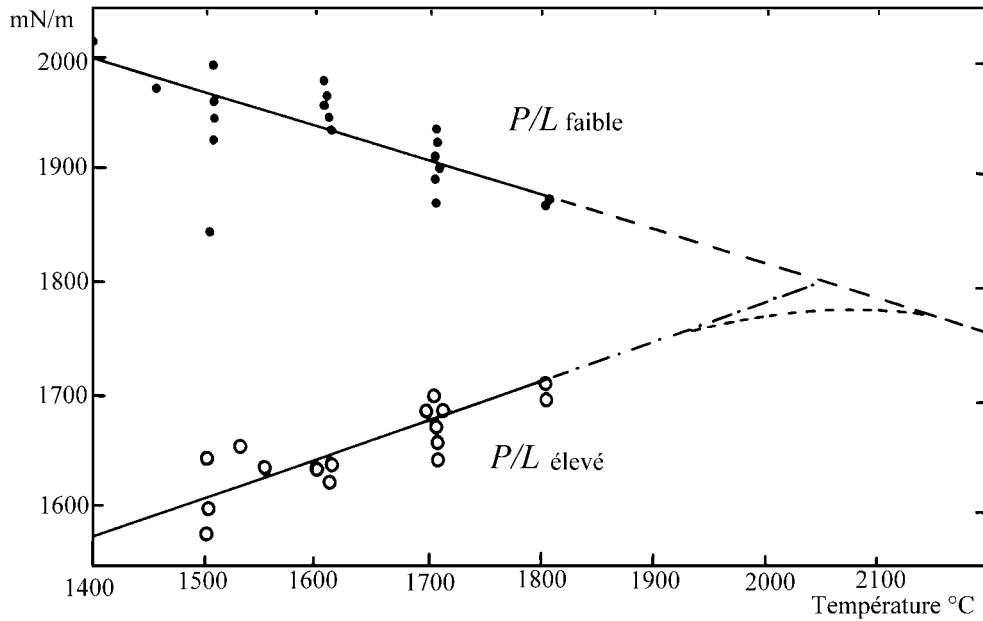


Figure I.14 : Mesure de tension de surface pour deux aciers ; projection de ces valeurs au delà de 1800°C (l'écart de proportion en soufre est de 160ppm) selon MILLS [Sou 17]

HEIPLE va même jusqu'à doper les soudures par le biais du gaz d'assistance chargé en dioxyde de soufre ; l'ajout de 500ppm de SO_2 améliore de 80% le ratio P/L (cf. Figure I.15) [Sou 28].

Par ailleurs, les valeurs de tension de surface de l'alliage binaire fer-soufre augmentent quand on diminue la teneur en soufre. Ceci est confirmé par LO qui a étudié l'effet du soufre sur l'acier inoxydable 718 dans une gamme de 0.005 à 0.0116% [Sou 24].

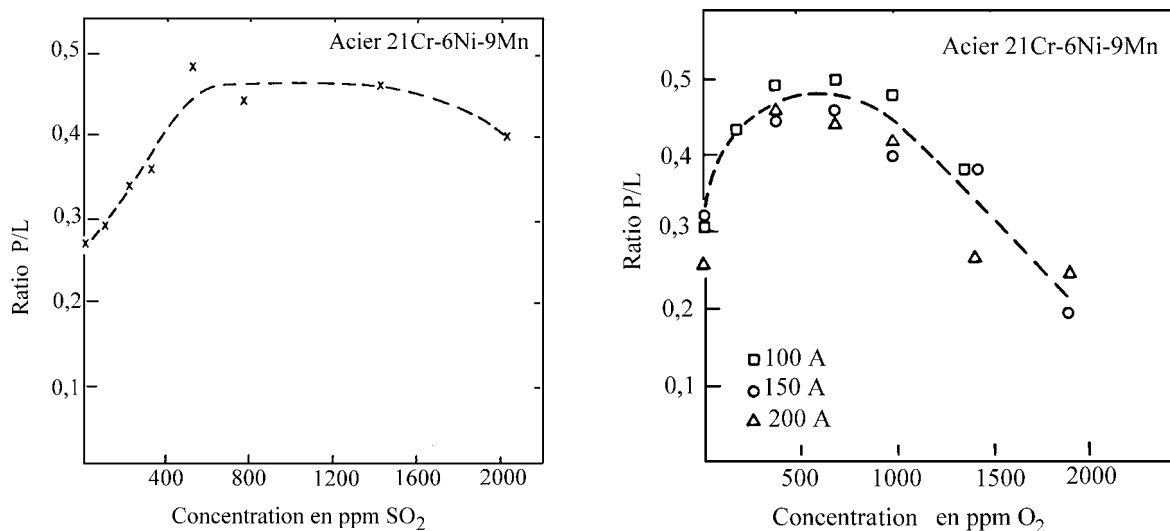


Figure I.15 : Variation du facteur de forme des cordons en fonction de l'ajout de SO_2 et d' O_2 dans le gaz d'assistance [Sou 28]

Comme nous l'avons expliqué, le gradient de tension de surface est une grandeur à surveiller avec attention. SAHOO et al. mesurent la température d'inversion de ce gradient qui, pour des teneurs en soufre comprise entre 80 à 200ppm, se situe entre 1950 et 2200°K. Cette

température tend à augmenter avec la teneur en soufre (cf. Figure I.10) [Sou 25]. Ceci corrobore les résultats de HEIPLE et al. qui estiment cette température à 2300°K [Sou 26].

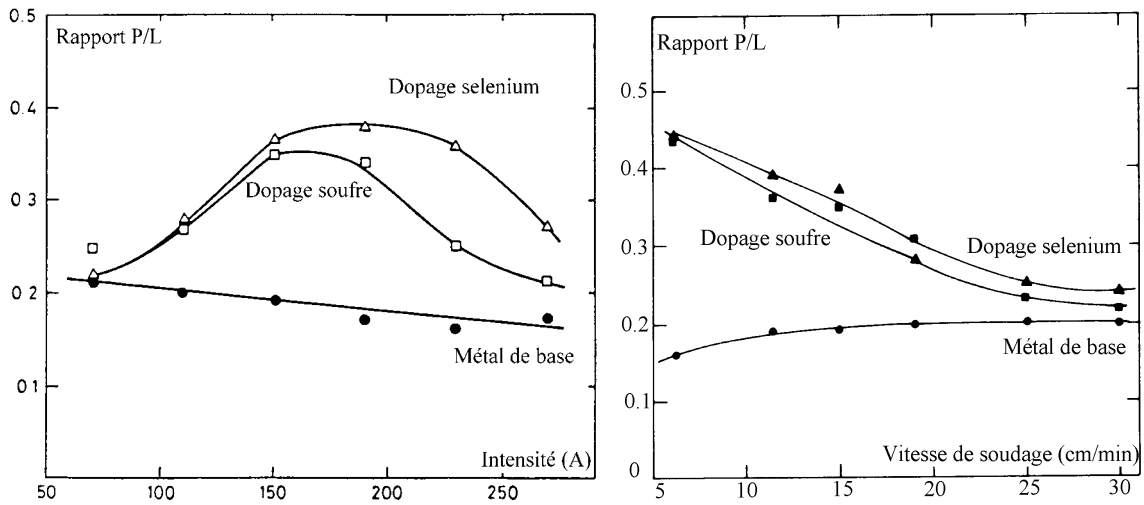


Figure I.16 : Evolution du rapport P/L à différentes intensités, vitesses et dopages [Sou 6]

BURGARD et al. ont, pour leur part, fait apparaître une valeur d'intensité optimale au sens de la recherche du meilleur ratio pénétration sur largeur ; ce qui confirme l'existence de cette température critique pour une énergie nominale donnée (cf. Figure I.16) [Sou 6].

WALSH et al. notent en surface du bain l'existence de deux composés du soufre : le sulfure de fer localisé dans les régions plus froides et le soufre libre présent dans les zones les plus chaudes (car complètement dissocié) [Sou 27].

Ainsi, la température influencerait non seulement les valeurs des tensions de surface mais aussi la quantité d'éléments libres en surface et donc la concentration en éléments tensioactifs. Aussi peut-on dire que la température est un facteur d'influence complexe, direct et indirect, sur les valeurs de tension de surface.

Quant au sélénium, une addition de 0.1% massique de Se dans un acier diminue sa tension superficielle de 30% comme présenté Figure I.17.

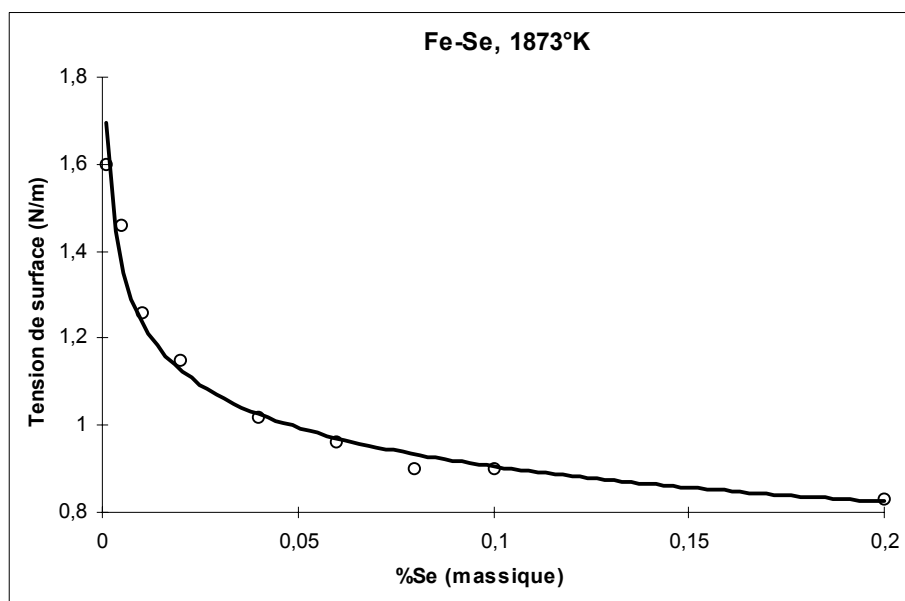


Figure I.17 : Variation de la tension de surface du Fe-Se à 1873°K [Sou 25]

- **L'oxygène**

L'oxygène est aussi un élément tensioactif. Par contre, son effet est moindre par rapport au soufre.

Néanmoins, avec une quantité dépassant les 60ppm, on aboutit en général à un gradient thermique de tension de surface positif.

De plus, il est connu que l'ajout d'oxygène dans le gaz d'assistance accroît la pénétration. Ainsi, SUNDELL et al. mais aussi MARYA et al. constatent que l'addition d'O₂ dans la torche augmente le facteur P/L, la tension d'arc et apparemment l'apport calorifique [Sou 29-30] (cf. Figure I.15). Il faut pourtant noter que, l'oxygène ayant une très grande affinité électronique, il va se combiner avec d'autres éléments pour former des composés stables. Ces réactions sont généralement fortement exothermiques et peuvent, parfois, faire douter de l'effet purement tensioactif de l'ajout d'O₂ dans le gaz d'assistance.

HEIPLE et al. déterminent une température d'inversion de l'effet pénétrant évalué à 2650°C comme dans le cas du soufre [Opt 25].

INDACOCHEA et al. ont, eux, étudié l'influence de la présence d'oxygène dans le bain et son impact sur la microstructure et la pénétration pour deux nuances d'acier au carbone (ASTM 1010 et 1020 qui sont des aciers à 0,1 et 0,2 % de carbone). Le procédé testé étant le soudage par arc submergé sous flux, les variations de pourcentage en O₂ résultent des modifications des compositions des flux de soudage et de leur effet « polluant » sur le bain.

Pour ce qui est de l'influence sur la morphologie de bain, les résultats sont contradictoires pour les deux nuances testées. Alors que les variations d'O₂ s'échelonnent de 600 à 1200ppm, les pénétrations augmentent de 15 à 45% pour le 1010 mais elles diminuent de 25 à 40% pour le 1020 [Sou 31].

Il faut être prudent pour analyser ce type d'essai dans lequel les risques de dégazage en oxygène sont importants (par formation de CO ou de CO₂). La concentration des différents éléments s'en voit alors nettement modifiée. Cependant, il semble qu'il faut aussi s'intéresser à la variation d'azote présent dans le cordon qui, d'après les auteurs, augmente d'environ 35% la pénétration pour une variation de 20 à 120ppm pour le 1010. Ainsi, l'azote couplé à l'oxygène pourrait avoir un effet favorable sur la pénétration.

- **Le tellure**

Le tellure est le dernier élément identifié comme capable de réduire la valeur de tension de surface conduisant à un gradient positif.

Ainsi, les dopants sont généralement des éléments du groupe VI du tableau de Mendeleïev (O, Bi, Se, Te, F, Cl, B), ils améliorent la pénétration et le facteur de forme du cordon soudé. Portant leur plage d'activation est limitée par une température d'inversion au delà de laquelle l'effet pénétrant ou dopant est perdu.

Or, il peut leur être opposé des éléments dont l'effet va, au contraire, faire diminuer le rapport P/L ; je les qualifierais, par abus de langage, de « tensionocifs ».

I.3.4.d. Les éléments « tensionocifs » des aciers

- **Le calcium, le cérium et le lanthane**

Le calcium, le cérium et le lanthane sont des éléments aux propriétés désulfurantes. En effet, ils ont une très grande affinité avec le fer et le soufre pour former des éléments stables comme Fe-Ca-S ou Fe-Ce-S. Ils diminuent ainsi le potentiel réactif du soufre et donc l'efficacité de

l'effet tensioactif de ce dernier. Si la teneur en cérium ou en lanthane dépasse les 100ppm, la solubilité du soufre est réduite au point d'avoir un gradient thermique de tension de surface négatif.

- **L'aluminium**

A l'instar des éléments désulfurants présentés ci-dessus, l'aluminium est un élément désoxydant. Son ajout va rendre le bain des aciers inoxydables large et peu profond. Une fois de plus, les auteurs divergent sur la valeur exacte du pourcentage massique critique, mais au delà de 40 à 100ppm, le ratio P/L diminue rapidement. En fait, l'aluminium avidement oxygène réagit pour former de l'oxyde d'alumine (Al_2O_3) qui abaisse la teneur en oxygène libre dans le bain, mais aussi affecte les mouvements de convection ainsi que la recristallisation.

- **Le molybdène, le chrome et le titane,**

Leur tension propre est grande, par conséquent, il est peu probable qu'ils affectent la tension de surface de l'acier. Cependant, le chrome et le titane peuvent réduire la solubilité de l'oxygène dans le fer. Ainsi, l'addition de 0,1 à 5% de titane réduit la solubilité de l'oxygène et le gradient thermique de tension de surface résultant est négatif.

- **Le manganèse et le silicium**

Tout comme les éléments précédemment cités, le manganèse et le silicium ont un effet désoxydant important. L'accroissement de 0,13 à 0,5% de silicium dans les aciers faiblement alliés augmente le volume fondu du bain ainsi que le rapport P/L. Il semble pourtant que le principal effet de cet élément d'addition soit sur la viscosité du métal fondu. Ainsi OYLER et al. [Sou 32] montrent que pour un acier inoxydable 304 :

- le métal liquide est fluide pour des teneurs en Si > 0,7%,
- il sera plus visqueux si Mn < 1,4% et Si < 0,3%.

I.3.4.e. Cas du carbone

L'effet du carbone est nul vis à vis de la tension superficielle du fer liquide, ainsi que des phénomènes de solubilité du soufre et de l'oxygène dans le bain. Par contre, comme nous allons le voir au chapitre suivant, il va fortement conditionner la soudabilité du matériau et les risques d'apparition de défauts tels que la fissuration à froid.

Pour clore cette partie sur l'effet des différents éléments sur la pénétration et la morphologie du bain, il est à noter que de nombreuses études ont été menées sur les aciers en général et particulièrement sur les aciers inoxydables. Cela nous renseigne sur les causes des problèmes opératoires rencontrés en cours de soudage. Entre autres, dans le cas d'assemblages de matériaux différents (nuances ou coulées différentes), il est courant de constater que le bain résultant n'est pas symétrique ou bien que le cordon réalisé n'a pas la même morphologie d'une pièce sur l'autre. Ceci n'a rien d'étonnant au vu des variations de soudabilité résultant des micro-modifications du métal de base.

Cependant, nous ne disposons pas des mêmes quantités d'informations en ce qui concerne les alliages de titane et nous ne pouvons qu'espérer retrouver des comportements similaires. Il faut tout de même noter que la coulée des alliages de titane requiert une plus grande attention et par voie de conséquence, les micro pollutions sont beaucoup moins marquées.

On peut néanmoins constater qu'il est fait mention par GUREVICH et al. d'effets de traces d'halogènes en surface des aciers et des alliages de titane qui favoriseraient la pénétration du bain de fusion [Sou 33-34]. Ces constatations, réalisées pour du soudage vertical sous laitier des alliages de titane, ont conduit à l'évolution du procédé TIG vers le procédé ATIG.

MARYA quant à lui, met en évidence la sensibilité au taux de fer et d'oxygène présent dans le métal sur la soudabilité du titane [Sou 35]. Ces éléments d'addition favorisent l'obtention de cordons pénétrants mais les causes n'en sont pas connues. L'interprétation au sens des courants thermo-capillaires en surface n'en est cependant pas satisfaisante en elle-même, car le bain s'élargit tout en étant plus pénétrant.

I.3.5. Le gaz d'assistance

L'étude de la formation du bain de fusion nous amène logiquement à analyser ce qui se passe en surface, et plus précisément au niveau du gaz d'assistance.

Ce gaz qui débite par la torche à souder est indispensable lors du soudage TIG. Son effet sur l'arc électrique et le bain de fusion, essentiel, va varier suivant sa nature.

Il va servir de protection gazeuse du bain et de l'électrode mais va aussi stabiliser l'arc électrique.

De plus, il influence la morphologie du bain et les propriétés du métal fondu. Il est donc important de connaître les gaz utilisés et leurs effets sur le procédé de soudage et le cordon réalisé [Sou 36].

I.3.5.a. La protection gazeuse

Les propriétés physiques et chimiques du gaz vont conditionner son efficacité à protéger le bain fondu et l'électrode en tungstène de la pollution atmosphérique (oxygène, hydrogène ou azote).

Cette pollution peut se traduire par la mise en solution d'hydrogène dans le bain liquide qui va dégazer au cours de la solidification et créer des porosités rédhibitoires pour les cordons soudés.

Il peut aussi apparaître des oxydes ou des nitrures solubles ou non dans le bain, qui vont diminuer le taux d'éléments d'addition (exemple : le chrome dans le cas des aciers inoxydables). Cependant, la présence en faible proportion d'oxygène peut être bénéfique à la soudure, mais un taux excessif conduit à la détérioration irrémédiable des propriétés du métal soudé.

Ainsi l'utilisation de gaz neutres comme l'argon ou l'hélium sera privilégiée en soudage TIG. Pour assurer une meilleure protection, et éviter tout risque de turbulence des écoulements gazeux, ils devront être laminaires. Des gaz à forte densité seront donc préférés (cf. Tableau I.3).

Eléments	Potentiel d'ionisation (eV)	Densité (kg/m ³)
Argon	15,75	1,784
Hélium	24,58	0,187
Hydrogène	13,59	0,083
Azote	14,54	1,161
Oxygène	13,61	1,326
Dioxyde de Carbone	--	1,977

Tableau I.3 : Constantes physiques importantes des gaz de soudage

I.3.5.b. Influence sur la stabilité d'arc

En soudage TIG, l'arc est maintenu par un flux d'électrons dans un gaz ionisé. Le potentiel de dissociation et le potentiel d'ionisation du gaz sont des indices de la stabilité de l'arc.

L'ionisation, elle, est maintenue par les hautes températures présentes dans la colonne d'arc et est affectée par la conductivité thermique du gaz en présence. Une conductivité thermique élevée conduira donc à une réduction de la colonne d'arc et à une augmentation de la tension d'arc.

De plus, la pression d'arc est dépendante du gaz utilisé. Ainsi l'hélium, en gaz d'assistance, donnera une pression d'arc plus faible au centre de l'arc ce qui va diminuer sa stabilité aux faibles intensités. Par contre, aux intensités plus élevées, la présence d'hélium évitera la formation de défauts comme les caniveaux ou les morsures.

I.3.5.c. Effets sur la morphologie de la zone fondue

L'énergie de l'arc est dépendante du gaz qu'il ionise, gaz qui va conditionner la tension d'arc.

Ainsi, l'utilisation de hélium, de part son potentiel d'ionisation plus élevé, augmente la tension d'arc à intensité identique (cf. Figure I.18) [Sou 37]. Par conséquent, l'énergie incidente et donc le volume fondu seront plus importants. De plus, on peut ajouter des gaz actifs, comme l'hydrogène ou le dioxyde de carbone, à l'argon, ce qui va donner lieu à des réactions exothermiques favorables à la pénétration et à la mouillabilité du métal.

Il convient tout de même de limiter la proportion de ces gaz actifs afin de ne pas détériorer les propriétés mécaniques du joint soudé.

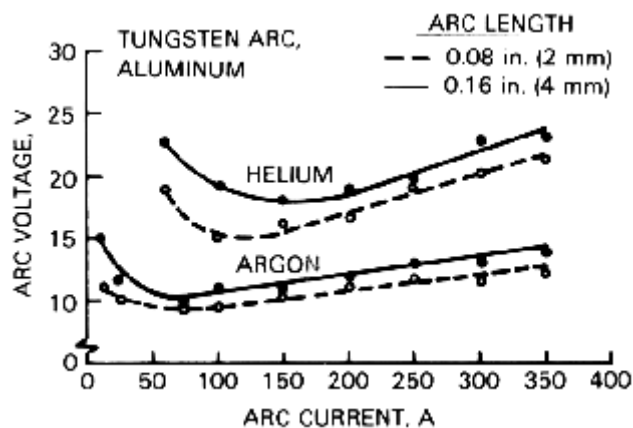


Figure I.18 : Evolution de la tension d'arc sous argon et sous hélium suivant l'intensité appliquée [Sou 37]

I.3.5.d. Incidence sur les propriétés du métal fondu

Le gaz d'assistance influence les caractéristiques du cordon soudé par :

- un contrôle du taux de porosité : les porosités diminuent la section de travail du joint réalisé et donc les propriétés mécaniques résultantes. Elles peuvent être limitées ou annulées par une judicieuse sélection du gaz d'assistance et par une protection efficace du bain ;
- un contrôle des caractéristiques de fusion du matériau : les défauts de fusion peuvent être minimisés par le choix d'un gaz qui permet d'augmenter les tolérances vis à vis d'autres paramètres opératoires (comme les gaz riches en hélium dans le cas de soudage d'aciers inoxydables) et par une augmentation de l'énergie incidente ;
- un maintien du taux en éléments d'alliage : les éléments d'addition réactifs, comme le titane ou le zirconium, le nickel ou le manganèse, seront affectés. La formation d'oxydes ou de nitrures va diminuer le taux de ces éléments d'addition qui ne pourront plus garantir les propriétés physico-chimiques et mécaniques du métal fondu. L'évaporation de ces

éléments sera fonction du pouvoir oxydant du gaz d'assistance utilisé. Une protection maximale sera obtenue en utilisant des gaz neutres.

I.3.5.e. Principaux gaz de protection

Nous avons vu que le choix d'un gaz n'est pas anodin. Détaillons donc maintenant les particularités de chacun.

- **L'argon**

C'est le gaz le plus couramment utilisé en soudage TIG. Totalement inerte et relativement lourd, il assure une excellente protection du bain et de l'électrode. Par contre, la présence d'un film d'oxydes ou de dépôts de surface réduit son efficacité. Enfin, son faible potentiel d'ionisation facilite l'amorçage de l'arc et se traduit par une colonne d'arc plutôt conique.

- **L'hélium**

Comme l'argon, l'hélium est chimiquement inerte mais a une densité très faible. Il faut donc débiter trois fois plus d'hélium pour obtenir une protection équivalente à celle de l'argon, or son coût est supérieur. La facture gazeuse finale est quatre fois plus coûteuse qu'une soudure sous argon, ce qui explique sa faible utilisation en soudage TIG. De plus, son potentiel d'ionisation élevé conduit à un amorçage d'arc qui se révèle difficile mais les énergies incidentes sont plus importantes comparativement à l'argon et permettent d'éviter les défauts de fusion (cf. Figure I.18). Par conséquent, les vitesses de soudage associées sont plus élevées et peuvent compenser le surcoût d'utilisation de l'hélium.

- **Les gaz actifs**

L'oxygène, l'hydrogène ou l'azote sont parfois utilisés, en faible proportion, en combinaison avec l'argon ou l'hélium.

L'oxygène est choisi pour répondre à deux fonctions qui sont de stabiliser l'arc mais surtout de modifier les tensions de surface du métal fondu et ainsi éviter les défauts surfaciques comme les caniveaux initiateurs de concentrations de contraintes.

L'hydrogène, quant à lui, grâce à sa conductivité thermique élevée, donne une tension d'arc plus élevée, favorable à une meilleure pénétration (gain de 50% avec 5% d'H₂) et à une section fondue plus importante. Cependant, le ratio géométrique pénétration sur largeur de bain diminue très nettement par cet ajout [Sou 31]. Par ailleurs, l'hydrogène, très réducteur, est utilisé pour éliminer la couche d'oxydes en surface du bain.

Pour ce qui est de l'azote, il sert, entre autre, à maîtriser les structures formées au cours de la solidification. Par exemple, l'ajout d'azote favorise la présence de ferrite dans le cas de soudure d'aciers duplex austéno-ferritiques. Le taux d'azote permet également d'affiner la taille de grains austénitiques des aciers austénitiques à haute limite élastique [Sou 38].

Cependant, il faut être extrêmement vigilant quant à l'utilisation de ces gaz à cause des phénomènes de pollution et de fragilisation. Une étude complète sur la sensibilité du matériau soudé est nécessaire avant tout ajout dans le gaz d'assistance.

I.4. Bilan

La réalisation de produits mécano-soudés passe obligatoirement par la fusion puis solidification des parties à assembler. Nous sommes donc confrontés à plusieurs problèmes qui sont :

- un problème thermique propre à la source de chaleur nécessaire pour réaliser la fusion du métal,
- un problème de mécanique des fluides gérant le comportement des différents courants au sein du volume fondu,
- un problème thermomécanique créé par les phénomènes de fusion solidification du métal et de conduction de la chaleur dans la pièce.

Il apparaît au vu des intensités maximales des courants et forces s'appliquant au bain métallique, que ce sont les courants de Marangoni et ceux induits de Lorentz qui peuvent majoritairement modifier la géométrie du cordon réalisé (cf. Tableau I.4).

Type de courant	Célérités	Effet sur le bain
Courants thermo-capillaires (Marangoni)	0,1 à 1,5m/s	Courants pénétrants ou mouillants, les plus influents sur la morphologie de bain quand $I < 250A$
Courants de Lorentz	$I < 200A : 0,1m/s$ $I > 200A : 0,4 à 2m/s$	Courants pénétrants, peu influents sur la géométrie de bain si $I < 250A$
Cisaillement aérodynamique	Maximum : 0,5m/s	Courants mouillants, peu influents sur la morphologie du bain
Flottabilité	0,05m/s	Courants mouillants, négligeables

Tableau I.4 : Intensités des différents courants de convection présents dans le bain

Tous ces phénomènes sont intimement liés et difficiles à découpler. Ainsi, faudra-t-il user d'artifices pour observer l'effet de tel ou tel paramètre. Malheureusement, l'apport d'aide numérique reste limité au vu de la complexité à modéliser correctement l'ensemble du problème.

Enfin, à ces difficultés de compréhension phénoménologique, vont venir se greffer des problèmes métallurgiques qui vont compliquer encore l'opération de soudage. Fondre puis solidifier avec une géométrie de cordon idéale, n'est pas le seul impératif pour réaliser des soudures acceptables ; loin s'en faut. La maîtrise du procédé passe aussi par une parfaite compréhension métallurgique des événements thermiques que l'on fait subir à la soudure et à son proche voisinage.

Dés à présent sont posés les grands axes d'une étude de soudage, que ce soit au niveau du gaz d'assistance, du bain de fusion ou de la technique employée.

II. Problématique du soudage TIG

Nous venons de présenter l'ensemble des phénomènes qui conduisent à la formation du bain de fusion. L'impact de la qualité des sources thermiques ainsi que la présence d'éléments résiduels affecte fortement la soudabilité des matériaux en soudage TIG.

Nous allons, dans ce chapitre, rapidement rappeler les contraintes du soudage des aciers inoxydables et des alliages de titane, qui, sous réserve de certaines précautions exposées ci-après, sont peu problématiques.

Puis nous présenterons l'ensemble des améliorations possibles de ce procédé avec comme objectif un maximum de l'énergie spécifique au sein de l'arc. Il sera alors fait mention de la recherche de géométrie d'électrode optimales, d'influence de la longueur d'arc et d'utilisation de mélanges gazeux pour s'affranchir des limites en pénétration du soudage TIG. De plus, nous présenterons deux alternatives que sont l'utilisation d'une torche double flux en soudage TIG, réalisant une constriction de la colonne ionisée par un gaz annulaire en périphérie de l'arc, et l'utilisation du soudage plasma.

Enfin, nous aborderons la technique ATIG. L'utilisation de flux solides s'inscrivant dans le métier traditionnel des soudeurs, pensons aux flux développés pour les électrodes enrobées, le soudage par arc submergé ou l'utilisation de fils fourrés en MIG, nous ferons un état des utilisations des flux en soudage avant de présenter le procédé ATIG et les interprétations des actions des flux utilisés.

II.1. Soudabilité

Les aciers inoxydables et les alliages de titane présentent finalement peu de problèmes de soudabilité. L'annexe 2 décrit plus précisément les différentes difficultés rencontrées en soudage ainsi que les moyens classiques d'y remédier.

Mais évoquons ici rapidement le cas de ces deux matériaux.

II.1.1. Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables ne sont pas spécialement difficiles à souder en TIG. Notons simplement que les aciers inoxydables austénitiques (les plus utilisés en mécano-soudage) sont parfois sensibles à la corrosion intergranulaire ce qui peut être limité par une hyper-trempe et le choix d'une coulée à bas taux de carbone.

Il n'empêche qu'il faut assurer, en envers des cordons, une protection gazeuse qui évitera l'oxydation et la formation d'un cordon rocheux, la torche TIG, suffisant à assurer la couverture gazeuse endroit pour réaliser des assemblages sains.

Le cas des assemblages de coulées ou de nuances différentes peut s'avérer problématique. Il est pourtant fréquent, dans les constructions mécanosoudées, d'assembler des matériaux de natures différentes. Or, comme nous l'avons vu au chapitre I.3.3 concernant les effets de la microchimie sur les courants thermo-capillaires et leur influence sur les morphologies de bain, la soudabilité différentielle entre les deux éléments à assembler peut conduire à des géométries de cordon dissymétriques au risque de perdre la pénétration souhaitée, voire à faire du collage (cf. Figure II.1).

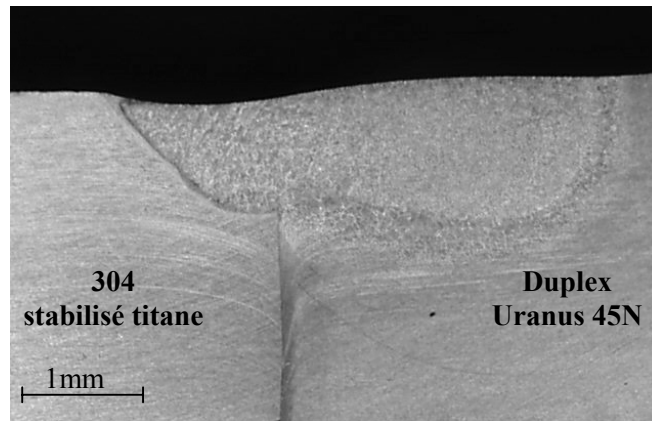


Figure II.1 : Soudage d'un acier duplex austenno-ferritique et d'un 304 stabilisé titane, cordon fortement dissymétrique (Photo ECN x8)

LAMBERT a étudié précisément ce type d'assemblages délicats. Il en déduit que les facteurs influant la soudabilité sont bien sûr le taux de soufre mais aussi celui du phosphore et de l'aluminium [Met 1]. Il préconise alors d'utiliser une hauteur d'arc très courte, des intensités et des vitesses faibles (garantissant l'énergie nominale nécessaire pour réaliser la fusion), ainsi que d'ajouter de l'hydrogène au gaz de protection (jusqu'à 5%).

Bien que les épaisseurs à assembler ne soient pas importantes (inférieures à 3mm), les préparations de bords et les passes multiples seront souvent la seule solution garantissant un cordon pleinement pénétré et symétrique.

II.1.2. Les alliages de titane

Le soudage des alliages de titane ne présente pas de problème particulier sous réserve de quelques précautions indispensables.

Sa très grande affinité pour des éléments présents dans l'air ambiant, comme l'oxygène, l'azote et l'hydrogène, impose d'utiliser des protections gazeuses en endroit et envers. Il est donc nécessaire d'avoir des traînards volumineux ou des systèmes de boîte à gant, pour couvrir suffisamment longtemps le cordon réalisé.

De plus, le titane subit un grossissement de grain exagéré irréversible par de simples traitements mécaniques. Il faut donc chercher à limiter l'énergie thermique incidente.

Le bain de titane est fluide et mouillant, donnant, après soudure un aspect de cordon lisse dont les propriétés mécaniques et anticorrosives sont conservées en absence de pollution du bain.

Sous réserve de respecter quelques règles simples les assemblages de ces deux matériaux sont peu problématiques. Néanmoins le soudage TIG de ces métaux est desservi par :

- son faible rendement d'arc qui conduit à une énergie spécifique faible,
- la tendance naturelle qu'ont ces matériaux à favoriser une morphologie de bain fondu mouillante plutôt que pénétrante (le cordon est large et peu profond).

Les épaisseurs soudées maximales sont donc limitées à 3mm pour les alliages de titane et de 3 à 4mm pour les aciers inoxydables suivant le taux de soufre dans la coulée (>60ppm).

Dans un premier temps, nous présenterons la recherche d'optimisation de la source thermique et de sa densité d'énergie, puis nous regarderons aussi quels peuvent être les palliatifs au soudage TIG, que ce soit des évolutions techniques ou l'utilisation d'autres procédés.

II.2. Optimisation du soudage TIG - solutions existantes

L'énergie spécifique de l'arc dépend, comme nous allons le voir, de la géométrie de l'électrode, du gaz d'assistance et de la longueur d'arc. Elle conditionne la qualité du transfert thermique vers la pièce et donc la quantité de métal fondu. Cependant, la morphologie du cordon soudé résulte d'une compétition de forces internes et externes au bain. Ces forces sont influencées par des facteurs non maîtrisables, comme par exemple, la présence ou non d'éléments tensioactifs dans le métal de base.

La densité d'électrons à l'anode, la température d'arc et l'écoulement du flux gazeux sont des données majeures régissant le volume et la forme de la zone fondue. Ces paramètres évoluent avec l'intensité et la tension d'arc, le type de gaz d'assistance, la géométrie et la nature de l'électrode mais aussi avec la composition du matériau à souder.

Nous allons revenir sur l'influence de ces paramètres facilement accessibles qui permettent d'améliorer l'efficacité et proposer, si possible, une série de valeurs optimales.

II.2.1. L'électrode

Les électrodes standards, dans le cadre du soudage des aciers inoxydables et des alliages de titane, sont thoriées à 2% et à géométrie conique. Nature et diamètre d'électrode, angles d'affûtage et longueur d'arc conditionnent l'énergie incidente et sa densité spatiale, la pression d'arc, les écoulements hydrodynamiques en surface du bain et donc la morphologie générale de la zone fondue et l'efficacité du procédé.

II.2.1.a. Nature de l'électrode

Suivant la nature des électrodes, et principalement de ses éléments d'addition, on peut obtenir un effet thermoïonique plus ou moins important (cf. Chap. I.3.1). Le tungstène ne devient thermoïonique qu'au voisinage de sa température de fusion (3410°C). Ainsi, si l'ajout d'éléments d'alliages permet d'obtenir un effet thermoïonique à plus faible température, la densité, la quantité d'électrons et la stabilité de l'arc en seront améliorées. Les éléments d'addition sont en général des oxydes métalliques dont les fonctions de travail sont basses [Opt 1].

On utilise classiquement des électrodes de tungstène thoriées (l'oxyde de thorium ThO_2 est allié à 1 ou 2%) qui permettent d'augmenter la capacité de courant généré (+20%), la durée de vie des électrodes et de limiter les risques de contamination du bain. Ces électrodes offrent un amorçage d'arc facile et favorisent une bonne stabilité d'arc. La géométrie de l'électrode est conservée au cours du soudage en courant continu direct, ce qui permet de garder optimaux les paramètres géométriques qui, nous le verrons, influent sur la qualité d'arc et de la soudure.

Cependant, le thorium, au cours du soudage, devient légèrement radioactif. Aussi, pour pallier cet inconvénient des éléments comme le cérium (CeO_2), l'yttrium (Y_2O_3) ou le lanthane (La_2O_3) sont peu à peu introduits comme palliatifs au thorium. Les caractéristiques sont alors sensiblement identiques aux électrodes thoriées [Opt 2-3].

Ainsi, par un choix judicieux d'électrode, peut-on favoriser l'apparition d'une émission thermoïonique qui augmentera la densité et la stabilité d'arc et prolongera la durée de vie des géométries d'électrodes choisies.

II.2.1.b. Affûtage et inclinaison d'électrode

Les auteurs diffèrent quant à leurs conclusions sur l'influence des différents paramètres et les valeurs optimales à sélectionner. Néanmoins, ils s'accordent tous sur le fait que de faibles

variations des configurations géométriques de l'électrode ou de sa position influent grandement sur le cordon obtenu.

On distingue comme variables de géométrie d'électrodes (cf. Figure II.2) :

- le diamètre de l'électrode,
- le type d'affûtage, qu'il soit conique ou en « tournevis »,
- pour les électrodes coniques, l'angle d'affûtage, qui correspond à l'angle au sommet du cône, et la présence ou non d'une troncature au sommet,
- pour les électrodes « tournevis », l'orientation de l'arrête par rapport au sens de soudage que l'on appelle parallèle ($//$), quand l'arrête est dans le sens du soudage, et perpendiculaire (\perp) quand l'arrête est orthogonale au sens de travail.

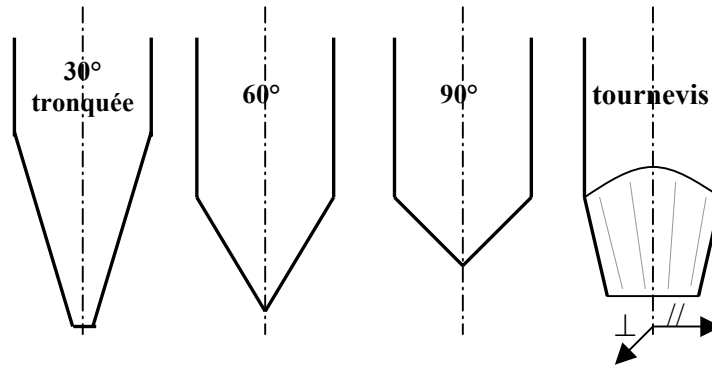


Figure II.2: Géométries d'électrodes

• Affûtage conique

La caractéristique électrique de l'arc, relation entre intensité et tension, est linéaire au delà de 50A². Mais l'angle d'affûtage, pour des intensités données, modifie les tensions d'arc qui deviennent plus importantes quand la conicité devient aiguë. DEBUIGNE rapporte ainsi des variations d'énergie incidente de 50% entre une électrode affûtée à 45° et une électrode affûtée à 120° (1850W contre 1280W à 200A) [Opt 4]. Par conséquent, une électrode aiguë fournira une énergie incidente supérieure.

LEE et al., par modélisation de l'arc électrique, aboutissent à des répartitions spatiales de température d'arc et de flux de courants [Opt 5]. Les variations de densité de courant ou d'isothermes, lorsque les angles d'affûtages varient de 30° à 120°, sont relativement faibles au regard de l'effet dû à la variation de la longueur d'arc. Ceci est principalement lié aux faibles variations de température au voisinage de l'anode. Cette tendance est confirmée par KEY et al. qui ont mesuré les températures au sein de l'arc et ont constaté que l'angle d'électrode influe sur la température maximale au sein de l'arc, sur les isothermes au voisinage de la cathode, mais que les effets induits à l'anode sont faibles [Opt 6].

Par contre, tous les auteurs s'accordent vis à vis de l'importance de la variation de géométrie d'électrode sur la pression d'arc et le cisaillement aérodynamique. Or, ces deux forces agissent de manière opposée sur la morphologie du bain fondu. La pression d'arc favorise la pénétration alors que le cisaillement aérodynamique conduit à un bain mouillant.

Rappelons que la pression d'arc utilise un « facteur d'ignorance », ou facteur de forme k , qui est fonction de la géométrie d'électrode et de la longueur d'arc (cf. Chapitre I.3.3.a).

² En deçà, la tension subit une chute brutale qui s'explique par la chute de résistivité du plasma liée à l'augmentation de la section et de la température de celui-ci quand l'intensité croît. Ce comportement intervient pour de faibles valeurs d'intensités, inférieures à 50A.

EROKHIN a mesuré les valeurs de cette poussée d'arc sur différents matériaux et sous différentes protections gazeuses. Les valeurs du coefficient k varient de $3,9 \cdot 10^{-5}$ à $8,2 \cdot 10^{-5} \text{g/A}^2$ [Opt 7].

MILLS et al. ont effectué une étude similaire dont il ressort que la pression d'arc passe par un maximum quand l'angle d'affûtage est de 45° ; en deçà la pression d'arc augmente avec l'angle de cône, au-delà elle décroît [Opt 8]. Les résultats des différentes études sur le cisaillement aérodynamique montrent que les célérités de ces courants sont très faibles et souvent négligées.

Cependant, il est important de voir si, globalement, la géométrie du cordon soudé est affectée par les modifications de géométrie d'électrode. Sur ce point, les auteurs arrivent à des conclusions diverses (cf. Figure II.3).

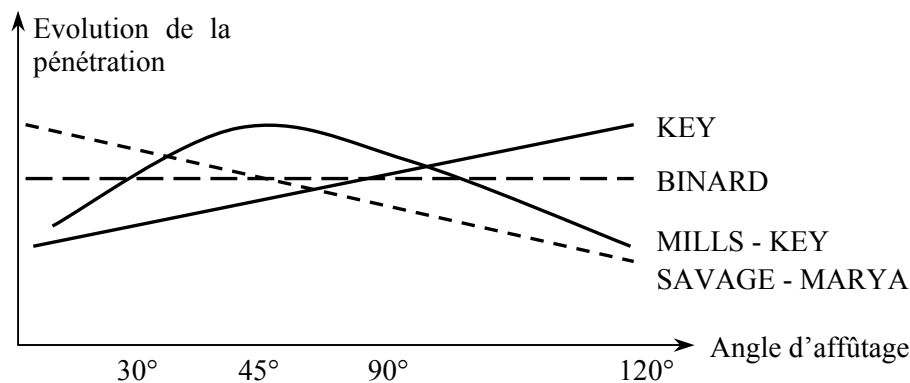


Figure II.3 : Evolution qualitative de la pénétration avec l'angle d'affûtage selon les différents auteurs

En ce qui concerne la pénétration par exemple, BINARD ne remarque aucun effet sur la morphologie du bain fondu en faisant varier le diamètre d'électrode et les angles d'affûtage. Il indique cependant que la troncature de pointe d'électrode semble néfaste à la pénétration [Opt 9]. SAVAGE et al. constatent une perte de pénétration de 30% quand l'angle varie de 30° à 120° [Opt 10].

MARYA et al. notent un comportement identique dans le cas du soudage d'alliages de titane avec une perte continue de la pénétration quand l'angle d'électrode augmente, ceci n'apparaissant que si les intensités sont supérieures à 100A [Opt 11-12].

KEY, quant à lui, observe deux comportements sur deux nuances d'aciers différentes. Dans un cas, il obtient une augmentation continue de la pénétration ; dans le second cas, l'évolution passe par un maximum puis diminue quand l'angle d'affûtage varie entre 15° et 90° [Opt 13] (ceci peut être relié avec l'existence d'un maximum de la pression d'arc noté par MILLS). Il semble, comme le souligne KEY, que la nature différente des aciers testés perturbe l'interprétation. Il faut effectuer une analyse plus globale et prendre en compte, entre autre, la présence de micro-éléments d'alliages qui déprécient ou améliorent la soudabilité des matériaux ; la géométrie d'électrode devenant alors un catalyseur de ces effets. Les mêmes considérations peuvent être faites en ce qui concerne la largeur de bain.

Néanmoins, SAVAGE et al. ont déterminé une relation intéressante liant la largeur de bain, l'angle d'électrode et la longueur efficace d'arc [Opt 10]. Cette relation simple traduit la dépendance de la largeur de bain avec la racine carrée du paramètre de dispersion de l'arc (défini comme le produit de la longueur d'arc efficace par le cosinus du demi-angle au sommet de l'arc) :

$$L = 6.7 \delta^{0.5} \quad \text{avec } \delta = l_{\text{efficace}} * \cos(\theta/2) \quad \text{Équation II.1}$$

Ceci se traduit par une réduction de largeur d'un facteur 2 quand l'angle au sommet de l'électrode passe de 30° à 120° .

Donc, si l'importance de la conicité est grande à la cathode, elle reste peu influente sur les répartitions d'énergie et de température en surface de l'anode.

- **Affûtage tournevis**

Ce type d'affûtage, peu utilisé, modifie les différents types de structures de solidification ainsi que la susceptibilité à la fissuration des cordons.

HABCHI et MARYA ont étudié, sur les aciers inoxydables austénitiques, l'influence de l'orientation de l'arrête. Il en ressort que cet affûtage réduit la fissuration solidification observée sur du 304 et 316L et modifie la morphologie du bain [Opt 14-15].

Pour une orientation d'arête parallèle au sens de travail, on observe une augmentation de la largeur de bain et une perte en pénétration donnant un faible ratio P/L de 0,17 (contre 0,33 pour des paramètres identiques en affûtage conique). Cependant, cette configuration fait disparaître les fissures présentes avec des électrodes coniques. La solidification dans le bain se fait sous forme de grains plus fins et non orientés qui sont moins propices à la fissuration à chaud.

Dans le cas d'une orientation perpendiculaire au sens de travail, la largeur de bain est réduite et on obtient alors des rapports P/L de 0,47. Cependant, ces cordons présentent des fissures de longueurs inférieures à celles notées avec des électrodes coniques. La solidification dans le bain se fait avec des grains de structure basaltique orientés vers la ligne centrale du cordon (plus propices à la fissuration solidification intergranulaire) (cf. Figure II.4).

L'influence sur la taille de grain est encore accentuée avec le soudage d'alliages de titane qui présentent un fort grossissement de grain. Ainsi, MARYA et al. remarquent que, pour les fortes intensités, les angles d'affûtages aigus d'électrodes coniques donnent des structures basaltiques avec la présence de grains centraux colonnaires [Opt 11-12]. Ces structures s'affinent quand l'angle d'électrode augmente devenant alors équiaxes. L'utilisation d'électrodes taillées en tournevis conduit à des volumes fondus plus réduits et ainsi les structures résultantes sont de type équiaxe. Cette réduction du volume fondu est en partie due à des instabilités d'arc au droit de l'arrête. Plus généralement, les structures équiaxes résultent de volumes fondus plus faibles et peuvent être obtenues pour des épaisseurs soudées relativement réduites.

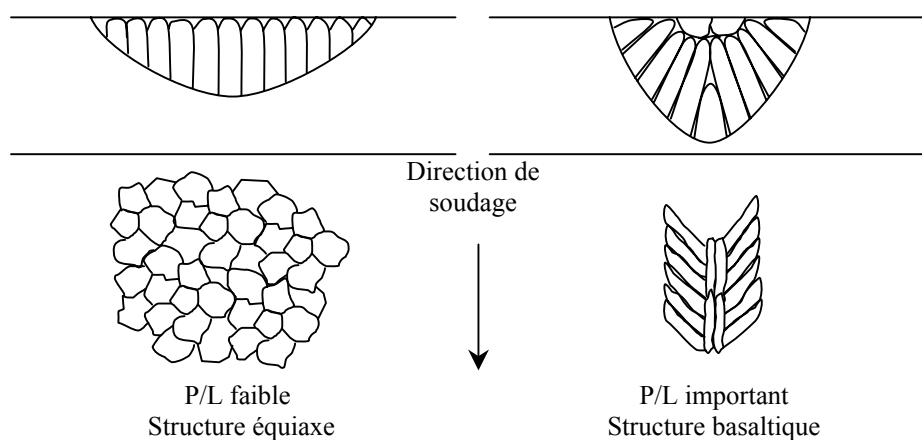


Figure II.4 : Structures de solidifications et morphologie de cordon

Finalement, il paraît difficile de conclure sur une géométrie optimale d'électrode. Cependant, pour les procédés automatisés industriels, les angles d'affûtage sont choisis afin de garantir une durée de vie et une stabilité du procédé optimale. Les angles les plus utilisés sont compris entre 45° et 90°. Manuellement, les opérateurs choisissent généralement des électrodes très aiguës, d'angle au sommet compris entre 15° et 45°.

Par ailleurs, tronquer le bout de l'électrode, s'il augmente la durée de vie de la géométrie initiale, réduit la pénétration. Quant aux électrodes biseautées, elles risquent de créer des sauts d'arcs sur leur arête difficiles à maîtriser.

Nous avons essayé de regrouper les différents effets des modifications de géométrie d'électrode dans le Tableau II.1. L'absence de règle absolue permettant de choisir une configuration optimale nous conduira par la suite à figer ce paramètre expérimental au cours de notre étude.

Paramètres	Influence
Diamètre électrode	Influence nulle
Tension d'arc	Augmente quand l'angle est aigu, l'énergie incidente est plus importante
T° maximale cathode	Diminue avec l'angle de cône
T° maximale anode	Pas influencé par l'angle d'électrode
Pression d'arc	Passe par un maximum pour 45°
Pénétration	BINARD : sans effet, troncature néfaste pour la pénétration SAVAGE - MARYA : chute de pénétration quand l'angle augmente MILLS : passe par un maximum puis chute
Structures de solidification	Conique : affinées quand l'angle de taille augmente, Biseautées : \perp grains basaltiques orientés vers le centre du cordon, // grains plus fins équiaxes
Fissuration à chaud, (fissuration solidification)	Conique : diminue quand l'angle d'affûtage augmente, Biseautées : // annule les fissures présentes avec un affûtage conique, \perp diminue la taille des fissures de solidification par rapport aux affûtages coniques

Tableau II.1: Récapitulatif des effets de géométrie d'électrodes

• Inclinaison de l'électrode

Selon MILLS, l'influence de l'inclinaison de l'électrode dans le plan de travail (plan définit par la direction de déplacement et l'axe de l'électrode) augmente les effets des forces électromagnétiques au sein du bain [Opt 8]. Les mouvements tourbillonnants, créés par les forces induites de Lorentz, favorisent une meilleure pénétration de bain ainsi qu'une morphologie fondue de rapport P/L plus élevé. Il ne définit, pas pour autant une valeur d'inclinaison optimale pour les soudures.

Les échanges avec des soudeurs manuels et automatiques de la société B.S.L. industries nous ont éclairé sur les habitudes de ces utilisateurs. Il en ressort qu'ils préfèrent des électrodes très affûtées (entre 15° et 45°).

De plus, les opérateurs manuels orientent naturellement leurs électrodes d'une valeur comprise entre 30° et 60°, « poussant » le bain (l'électrode est penchée en arrière de l'arc suivant le sens de déplacement).

Les procédés automatiques, quant à eux, conservent une orientation perpendiculaire des électrodes par rapport au joint à souder.

II.2.1.c. Longueur d'arc

Bien qu'indépendante de la nature et de la géométrie d'électrode, la longueur d'arc va conditionner la tension d'arc.

Si la source électrique dispose d'un asservissement en tension, la torche TIG, et donc l'électrode, sera positionnée automatiquement pour créer la longueur d'arc correspondant à la tension de consigne. Par contre, si l'on fixe la distance entre l'électrode et la pièce à souder, la tension résultante ne sera pas maîtrisée par l'opérateur. Il va de soi qu'une augmentation de la tension d'arc traduit une énergie incidente plus importante.

Or, l'augmentation de la longueur d'arc diminue également la densité d'énergie. De plus, la pression d'arc va chuter conduisant à une réduction de la pénétration, comme le mesure EROKHIN au travers du coefficient k (k variant de $5 \cdot 10^{-5}$ à $2 \cdot 10^{-5} \text{g/A}^2$ quand la longueur d'arc croît de 1 à 10mm) [Sou 8].

Ainsi, plus que pour l'affûtage des électrodes, de petites variations de longueur d'arc peuvent modifier grandement la morphologie et l'efficacité des soudures réalisées. En réponse émergent des systèmes automatisés de plus en plus performants qui cherchent à assurer le maintien en position de l'arc au droit du plan de joint à souder (suivi de joint) et conserver l'énergie incidente de l'arc (asservissement de tension ou de longueur d'arc).

II.2.2. Gaz de protection

Le gaz de protection, comme la géométrie de l'électrode, peut être optimisé pour réaliser des cordons pénétrants ou plus mouillants.

Comme nous l'avons vu au chapitre I.4 concernant les gaz d'assistance, l'argon est le principal gaz de protection utilisé en TIG. Il arrive que l'on utilise un mélange argon-hélium ou parfois aussi un mélange argon-hydrogène (limité à 5% d' H_2). Les mélanges argon-hélium sont particulièrement utilisés en soudage automatique, donnant des cordons fortement pénétrants avec des vitesses importantes. Les mélanges argon-hydrogène, quant à eux, sont généralement utilisés en soudage manuel, favorisant le décapage du bain et améliorant les vitesses de réalisation ainsi que les morphologies soudées.

BURGARDT et al mesurent, pour trois dopages d'aciers différents, le facteur morphologique du bain fondu P/L et constatent que pour le métal non dopé, contrairement aux prédictions, l'ajout d'hélium diminue cette valeur, alors que pour les aciers dopés au soufre ou au sélénium, ce ratio augmente comme prévu (jusqu'à une valeur de 0,5 pour l'acier dopé au soufre, contre 0,15 pour le métal non dopé) (cf. Figure II.5) [Opt 16].

L'hélium, de part son potentiel d'ionisation plus élevé, ainsi que sa meilleure conductivité thermique, conduit à une tension d'arc supérieure. L'énergie transférée est plus importante, mais sa densité plus faible (en effet, la distribution spatiale de température est plus large). On s'attendrait à améliorer la pénétration quelque soit le métal fondu, or l'ajout d'hélium augmente l'effet mouillant du métal de base ainsi que l'effet pénétrant des cordons dopés. Ceci confirme, aux yeux des auteurs, la prépondérance des courants thermo-capillaires qui conditionnent les morphologies des cordons.

Dans le cas de soudures d'aciers de nuances différentes, l'utilisation de mélanges argon-hélium ou argon-hydrogène, augmentant les énergies incidentes, va diminuer les problèmes de soudabilité différentielle ; les volumes fondus seront symétriques, évitant des problèmes de perte de pénétration ou de collage au plan de joint.

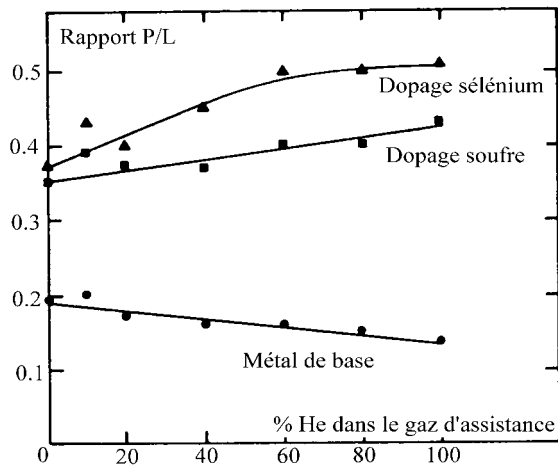


Figure II.5 : Influence de la teneur en hélium dans le gaz d'assistance sur P/L [Opt 16]

Quant au débit optimal dans la torche, il est impératif d'obtenir un écoulement laminaire afin de ne pas perturber le bain. On peut utiliser par exemple des diffuseurs à insérer dans la buse. La géométrie de celle-ci (principalement son diamètre) va conditionner le débit à utiliser, généralement compris entre 5 et 15l/min. De plus, il a déjà été fait mention, au chapitre I.2.3 sur le comportement du bain liquide, que le cisaillement aérodynamique crée des courants surfaciques centrifuges dont les vitesses sont très inférieures aux courants issus des gradients de tension de surface. On aura donc principalement à cœur d'assurer la protection gazeuse de l'électrode et du bain fondu.

Ainsi l'optimisation gazeuse d'une configuration de soudage ne passe pas uniquement par la prise en compte des caractéristiques physico-chimiques des gaz utilisés, mais aussi par la connaissance intime du métal soudé.

II.2.3. Energie incidente

L'intensité et la tension d'arc conditionnent l'énergie nominale incidente sur la pièce. Comme nous venons de le voir, le gaz de protection utilisé, la composition et la géométrie d'électrode modifient les quantités et densités d'énergie fournies par l'arc. Or, il s'avère que la présence, ou non, d'éléments tensioactifs dans le métal à souder va grandement déterminer la morphologie du cordon.

De tels éléments (cf. Chapitre I.3.3 traitant de l'influence de la microchimie du bain sur sa morphologie) présentent généralement des températures d'inversion au-delà desquelles, les écoulements thermo-capillaires deviennent mouillants plutôt que pénétrants. Or, l'utilisation de paramètres optimum permet d'atteindre et dépasser les températures d'inversion des courants de Marangoni en surface du bain fondu et donc, de privilégier la mouillabilité du bain plutôt que sa pénétration, ce qui n'est pas recherché initialement.

Ainsi, et ceci sera vrai pour toute optimisation en soudage, l'interaction entre les différents paramètres de soudage rend difficile toute proposition d'une série de paramètres opératoires optimum. Il est pourtant possible de rechercher, pour une coulée et pour une configuration donnée, le meilleur compromis opératoire en suivant les règles simples rappelées ci-dessus. En pratique, il faudra déterminer des « fenêtres de travail » pour les différents matériaux à souder et travailler si possible dans la zone de recouvrement de ces fenêtres.

L'optimisation du soudage TIG, qui améliore en partie les plages de pénétrations accessibles, au dépend de la flexibilité, est peu pratiquée dans les industries de la chaudronnerie. En effet, améliorer la nature et la géométrie d'électrode, utiliser des mélanges gazeux non standards et des systèmes automatisés (régulant la vitesse, la tension et la hauteur d'arc) conduit à des phases de mise au point relativement longues. De plus, ces recherches de paramètres optimaux, pour les assemblages standards, sont remis en causes à chaque changement de configuration de soudage et de nuance de matériaux soudés.

Il semble donc opportun, à ce stade, de proposer des alternatives au soudage TIG appliqué aux fortes épaisseurs, soit en changeant de procédé avec le soudage plasma, soit en modifiant la conception des torches TIG, c'est le cas des torches double flux. Enfin, le procédé ATIG, objet de cette étude, par simple utilisation d'un flux solide activant permet avec le même matériel de doubler les plages de pénétrations accessibles.

II.3. Alternatives au soudage TIG

Les procédés à haute densité d'énergie, comme le Laser, le faisceau d'électrons (F.E.) ou le soudage plasma, permettent de réaliser des assemblages de fortes épaisseurs sans métal d'apport. Les densités d'énergies, supérieures à 10^5W/cm^2 , permettent la formation d'un capillaire de vapeurs métalliques, appelé keyhole, au sein de la pièce à souder. L'énergie thermique est alors transférée au métal sur toute la hauteur du capillaire depuis l'intérieur de la pièce (en procédé classique, à l'arc, le transfert thermique s'effectue depuis la surface de la pièce). Il y aura donc minimisation des pertes par conduction et par rayonnement donnant lieu à un transfert de chaleur beaucoup plus efficace et permettant d'utiliser des vitesses de soudage plus importantes.

Comparativement aux procédés de soudage à l'arc classiques (TIG ou MIG), les volumes fondus et les zones thermiquement affectées sont réduits. La morphologie caractéristique de ces cordons est en forme de « clou » présentant une profondeur de pénétration très supérieure à sa largeur. Ainsi, les déformations, les modifications structurales et donc les traitements post-opératoires sont diminués et souvent annulés.

Néanmoins, des installations Laser ou F.E. sont très onéreuses (plusieurs millions de francs) et nécessitent d'assurer un volume de production important pour rentabiliser ces investissements. Ainsi cherche-t-on par d'autres moyens à améliorer le soudage TIG.

II.3.1. La torche double flux

Pour améliorer cette efficacité, nous avons vu qu'il est possible d'intervenir sur le gaz d'assistance pour concentrer l'arc. La torche double flux est une extension de cette idée simple cherchant à réaliser une constriction d'arc avec une seconde veine gazeuse en périphérie de l'arc initié entre l'électrode et la torche (cf. Figure II.6). Les gaz utilisés sont classiques en soudage TIG, c'est-à-dire de l'argon ou l'hélium comme gaz axial et de l'argon ou un mélange argon hydrogène ou argon hélium comme gaz annulaire.

On obtient ainsi un refroidissement annulaire de la zone ionisée qui concentre la densité d'arc et donc améliore l'efficacité du soudage TIG. Le gain de pénétration ou de vitesse est de 20% ce qui permet de passer 4mm d'épaisseur sur les aciers inoxydables en une seule passe sur préparation à champs droits contre 3.5mm en TIG.

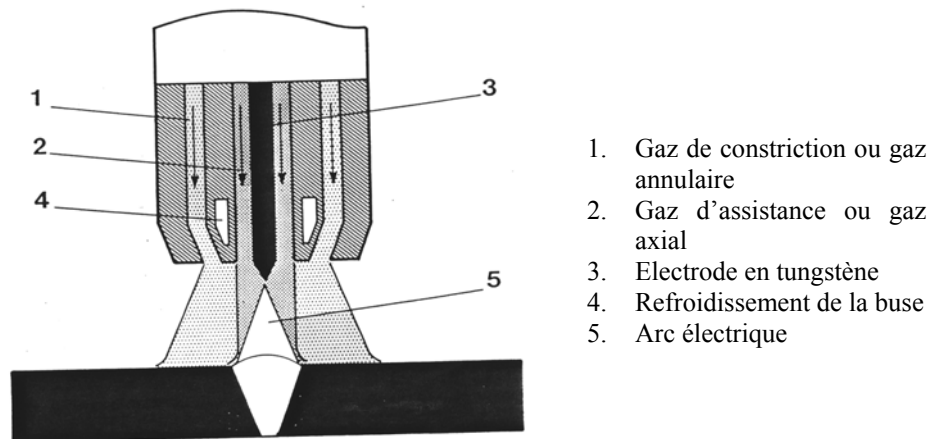


Figure II.6 : Présentation schématique de la torche double flux

Cependant, les gains de soudage restent relativement peu importants et ne permettent d'améliorer que très légèrement le champ d'application du soudage TIG.

II.3.2. Le soudage plasma

Le soudage plasma est une extension du soudage TIG dont la densité d'énergie et la vitesse d'éjection du plasma sont plus importantes. Ceci est obtenu en forçant le plasma d'arc (créé entre une électrode de tungstène et la buse de constricton ou la pièce) à s'évacuer au travers d'un orifice par un jet de gaz (cf. Figure II.7).

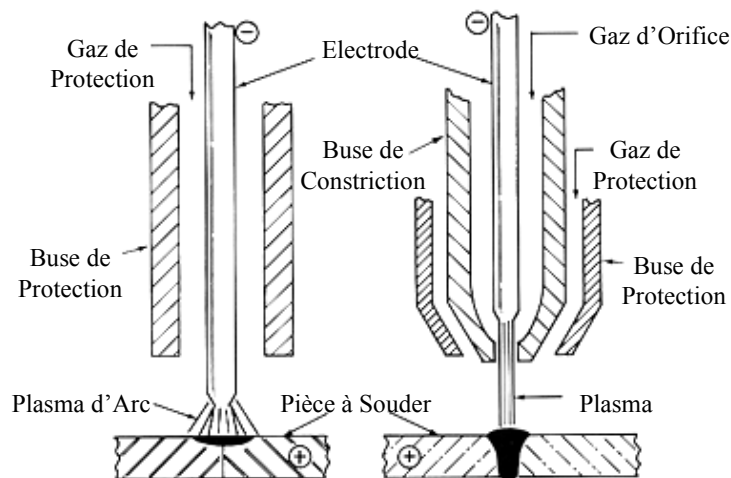


Figure II.7 : Comparaison entre une torche TIG et une torche Plasma

Le gaz sortant de l'orifice est ionisé par l'arc électrique et éjecté au travers de la buse de constricton pour former le jet de plasma. S'ajoute en plus un gaz de protection en périphérie de la buse, qui limite la pollution du bain métallique.

On distingue deux modes de fonctionnement appelés arc transféré ou arc non transféré, suivant que l'arc est réalisé entre l'électrode et la pièce à souder ou qu'il est établi entre l'électrode et la buse de constricton.

Le mode par arc transféré fournit une énergie incidente plus importante couplant l'énergie du plasma et de l'arc ; c'est le mode couramment utilisé en soudage.

Le mode d'arc non transféré permet de ne pas faire entrer la pièce dans le circuit électrique (soudage de pièces non conductrices) mais fournit une énergie moins concentrée que précédemment ; il est principalement utilisé pour la découpe.

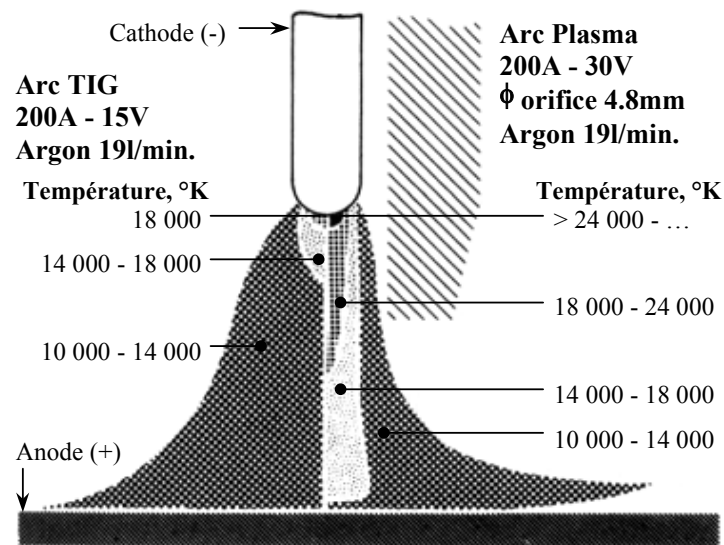


Figure II.8 : Comparaison entre l'arc TIG et le jet plasma

Le jet de plasma a pour propriété d'être rigide et orientable. Contrairement à l'arc TIG qui est attiré par le conducteur le plus proche, il peut être dirigé par la torche. De plus, il subit peu l'influence de champs magnétiques extérieurs et est peu sensible à la variation de longueur d'arc (ou plutôt hauteur de torche) qui est critique dans le cas du soudage TIG.

Les densités de courant importantes et la concentration d'énergie conduisent à des températures au sein du plasma qui sont supérieures à celles présentes dans l'arc (cf. Figure II.8) [Opt 17] ; il en résulte l'apparition d'un keyhole qui va favoriser la création de cordons étroits et pénétrants (cf. Figure II.9).

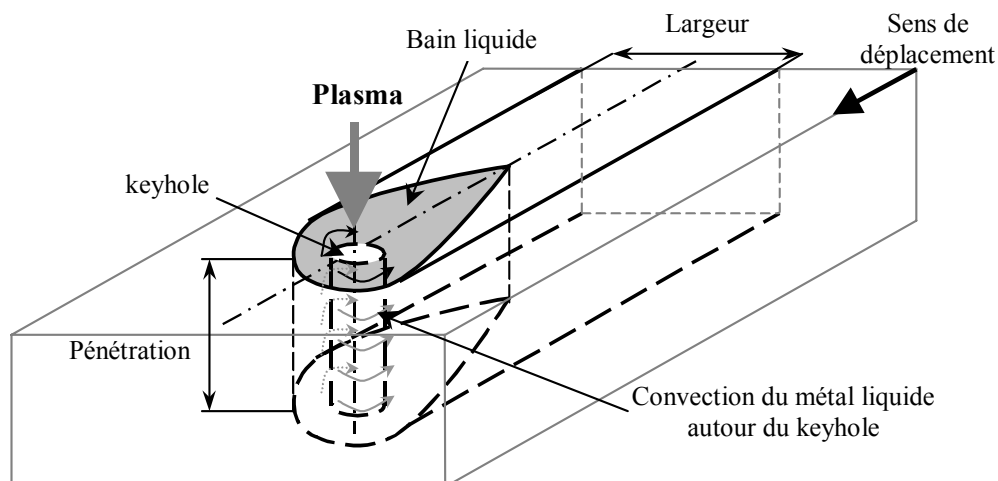


Figure II.9 : Vue schématique du keyhole en soudage plasma

Résumons maintenant les différents avantages de ce procédé par rapport au soudage TIG :

- la concentration d'énergie accrue permet d'utiliser des vitesses opératoires plus grandes ou des intensités plus faibles pour une profondeur de pénétration souhaitée. Les pénétrations maximales sont plus importantes qu'en TIG, permettant de réaliser de nombreuses applications en une passe, sans préparations de bords, ni de métal d'apport ;

- le volume fondu et la zone thermiquement affectée sont plus étroits (le ratio pénétration sur largeur est amélioré dépassant largement les valeurs obtenues en TIG : $P/L > 1$). Ceci réduit les contraintes de retrait et donc les déformations (jusqu'à 50% de réduction) ; de plus, la zone fondue est symétrique réduisant les déformations transverses ;
- la stabilité et la rigidité d'arc sont améliorées et le jet de plasma est partiellement orientable ;
- l'apport de métal est facilité par la distance relativement importante entre la torche et le bain et par l'absence d'électrode ;
- les variations de position de torche influent peu sur la morphologie de bain ou la concentration thermique facilitant le travail en position en mode non keyhole.

Cependant, il existe un certain nombre de limitations à ce procédé qui sont :

- la faible tolérance face au défaut d'alignement des pièces à souder ainsi que face aux variations de jeu dans le plan de joint. Ceci est dû à la « finesse » de la source thermique et impose une révision des préparations de bords ;
- les paramètres en soudage plasma sont plus nombreux (type et intensité d'arc, tension d'arc, géométrie et diamètre d'orifice de constriction, débit et nature de gaz d'orifice et de protection, diamètre et position de l'électrode dans la buse de constriction, hauteur de plasma) et ont des fenêtres d'utilisation relativement réduites ;
- le soudage manuel est généralement plus difficile à réaliser à cause d'une torche plus encombrante à utiliser qu'en soudage TIG, ce qui augmente la difficulté à stabiliser le keyhole ;
- les positions de soudage en mode keyhole sont généralement réduites à la position à plat ;
- la buse de constriction doit être entretenue et régulièrement inspectée pour assurer une qualité de soudage rigoureuse ;
- le coût d'investissement initial est dix fois plus important qu'en TIG et nécessite une plus grande technicité des opérateurs.

Les épaisseurs soudables maximales sont de 6mm pour les aciers au carbone et les aciers inoxydables avec des vitesses opératoires de l'ordre de 35cm/min (contre 4mm en TIG pour 15cm/min) et de 12mm pour les alliages de titane à 25cm/min (contre 3mm en TIG pour 15cm/min) (cf. Tableau II.2).

Les gains de pénétration s'expliquent par une densité d'énergie plus importante permettant de réaliser des assemblages en mode keyhole qui sont insensibles aux courants de convection de type Marangoni ; les écoulements de métal liquide s'effectuent de l'avant vers l'arrière du bain.

Cependant, la présence de ce keyhole couplé à une rapide resolidification, du fait du faible volume de métal fondu, peut conduire à la présence abusive de porosités dans le bain voire de défaut de type cavité longitudinale caractérisé par la présence d'un tunnel continu dans l'axe de la soudure.

Matériaux	Epaisseur mm	Intensité A	Tension V	Vitesse cm/min	Diamètre orifice mm	Débit gazeux ³ l/min	
						Orifice	Protection
Aciers au carbone Aciers faiblement alliés	3,2	185	28	30	4,4	6	28
	4,3	200	29	25	5,4	6	28
	6,4	275	33	35	5,4	7	28
Aciers inoxydables	2,4	115	30	60	4,4	3	17
	3,2	145	32	75	4,4	5	17
	4,8	165	36	42	5,4	6	21
	6,4	240	38	35	5,4	8	24
Alliages de titane	3,2	185	21	50	4,4	3,8	28
	4,8	175	25	33	5,4	9	28
	10	225	38	25	5,4	15 ^a	28 ^a
	12,5	270	36	25	5,4	13 ^b	28 ^b

Tableau II.2 : Paramètres opératoires typiques en soudage plasma

Le soudage plasma est donc une solution intéressante pour s'affranchir des limites du soudage TIG mono passe, malgré un investissement lourd en matériel et en formation de part l'exigence et la technicité du procédé.

II.4. Le soudage ATIG

Initié au PATON WELDING INSTITUT à Kiev, Ukraine, le soudage ATIG est le fruit d'une constatation réalisée au cours du développement du soudage vertical sous laitier d'alliages de titane. L'étude de laitiers adaptés à ce procédé, dont le but était de protéger et de raffiner le bain de titane, a mis en évidence l'existence de produits favorisant la formation de bains pénétrants en soudage à l'arc.

Vite transposée au procédé TIG, cette technique s'est révélée efficace mais a subi le joug de la confidentialité exercé par l'ancien bloc de l'Est. Ainsi, ce n'est qu'au milieu des années 90 que commencent à paraître les premiers articles traitant du sujet suite à la considérable ouverture scientifique créée par l'effondrement du bloc de l'Est et la fin de la guerre froide.

Le soudage ATIG utilise la même source et la même torche que le soudage TIG. La seule modification consiste en l'ajout, avant soudage, sur les bords du joint à souder, d'un flux actif (cf. Figure II.10). Le produit, ainsi déposé, contient des éléments qui vont venir modifier la répartition énergétique au sein de l'arc, ainsi que les écoulements dans le bain fondu. Le procédé est alors désigné sous le nom de ATIG pour Flux Activated TIG ou TIG Actif.

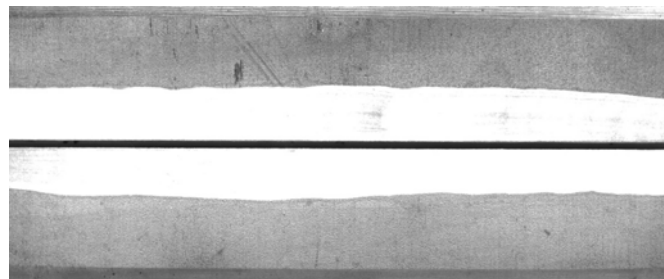


Figure II.10 : Dépôt de flux avant soudage (photo ECN)

³ gaz utilisé : argon sauf **a** : 75% He - 25% Ar et **b** : 50% He - 50 % Ar.

Comme nous allons le voir, le développement du procédé nécessite une parfaite compréhension des flux déjà utilisés en soudage et en brasage principalement, de leurs effets et de leurs utilisations en soudage ATIG.

Nous allons dresser ici un rapide état des développements et utilisations de flux, poudres et enrobages appliqués au soudage et au brasage.

II.4.1. Les flux en soudage

La plupart des flux de soudage est composé de produits minéraux nécessitant le minimum de purification et de traitement possible de façon à en réduire le coût de fabrication [Ati 1-2]. Cependant, le niveau de certaines impuretés, comme le phosphore ou le soufre, sont maintenus minimums. Les flux sont majoritairement utilisés par trois procédés :

- soudage manuel à l'électrode enrobée : le flux est collé autour d'une baguette de métal,
- soudage sous flux solide (ou arc submergé) : le flux est indépendant du métal d'apport et peut être utilisé avec différentes nuances de fil pour donner des compositions de cordon différentes,
- soudage avec fil fourré : le flux est emprisonné dans une baguette continue de métal.

Chaque procédé requiert des propriétés physiques et chimiques différentes pour les flux, cependant, la majorité des produits les composant est commune aux trois procédés et joue un rôle similaire dans chacun des cas.

Ces procédés ont grandement fait évoluer les connaissances sur les flux et leurs rôles au cours des opérations de soudage, cependant, les données se limitent essentiellement au développement de produits appliqués aux aciers ou aciers inoxydables [Ati 3-4].

La définition du *British Standard* pour les flux est la suivante :

“ Matériau utilisé au cours du soudage, brasage ou soudobrasage pour décaper chimiquement les surfaces du joint, pour prévenir de l'oxydation atmosphérique et pour réduire les impuretés ou les faire flotter à la surface du bain. En soudure à l'arc, beaucoup d'autres substances qui remplissent des fonctions spéciales sont ajoutées à la composition du flux ”.

La réalisation de soudures performantes (fort taux de dépôt de métal, qualité du cordon optimale) nécessite la convergence de nombreux phénomènes physiques dans l'arc et dans le bain.

Les flux doivent donc :

- stabiliser l'arc et contrôler la résistivité du plasma,
- fournir un laitier dont la température de fusion est appropriée au matériau à souder,
- permettre d'utiliser différents types de courant et de polarité,
- allier des éléments dans le bain tout en le raffinant (désoxyder et désulfurer),
- avoir une viscosité suffisante,
- avoir une densité compatible avec le métal liquide et favorable à un cordon endroit lisse,
- favoriser l'élimination du laitier,
- réduire les projections et les fumées.

On peut ainsi regrouper les effets sous trois familles génériques qui sont :

- effet métallurgique sur le cordon,
- effet électrique sur l'arc,
- effet mécanique sur le flux liquide.

Ce classement va nous permettre de détailler les particularités de chaque catégorie.

II.4.1.a. Rôle métallurgique

Les flux agissent doublement sur la métallurgie du bain. D'une part, ils protègent le bain à la fusion et au refroidissement contre la pollution gazeuse, d'autre part, ils ont une action directe de modification de la microchimie du bain (favorisant la présence de manganèse et de silicium dans le cordon).

Le facteur le plus important est la présence ou non d'oxygène dans le flux, qui va fortement influencer la microstructure, la dureté ou la présence de porosités dans le cordon.

Nous allons maintenant détailler les principales actions des flux et présenter les éléments qui assurent ou non ces effets.

- **Protection du bain**

Ces composés ont pour rôle de protéger la soudure des gaz atmosphériques. Les éléments comme le carbonate de calcium, le carbonate de manganèse et le carbonate de potassium se décomposent pour donner du CO₂. Le fluorure de calcium se décompose pour produire une couverture de fluor. Enfin, les matières organiques, comme la cellulose, produisent une protection gazeuse formée de monoxyde, dioxyde de carbone et d'hydroxyde de carbone.

On peut aussi inclure des éléments qui produisent un laitier après le passage de l'arc protégeant le bain, comme le carbonate de calcium et le carbonate de manganèse, le rutile, la silice, le talc et les oxydes de fer.

- **Agent décapant**

Le flux va diminuer les impuretés présentes dans le bain de fusion. Les principaux éléments décapants sont des matières minérales dont le carbonate de calcium et le carbonate de manganèse. L'oxyde et le fluorure de calcium, le rutile (TiO₂), la silice et les oxydes de fer jouent aussi un rôle décapant au cours de leur fusion.

- **Agent désoxydant**

L'ensemble des composés ferreux, comme le silicate de fer, le manganate de fer ou les poudres à base de fer, ont un effet désoxydant ou réducteur sur le bain. On évite ainsi la dissolution d'oxygène dans le métal liquide par formation d'oxydes de fer en surface du bain.

- **Indice de basicité**

Il est possible de distinguer des produits basiques, acides ou neutres, suivant leur nature. L'indice de basicité (Bi) va être calculé ainsi :

$$Bi = \frac{CaO + CaF_2 + K_2O + Na_2O + Li_2O + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad \text{Équation II.2}$$

Les flux acides, à fort taux de silice, donnent un laitier dense et visqueux conduisant à des cordons de bel aspect ayant une bonne résistance à la fissuration et des résiliences moyennes.

Les flux basiques, riches en CaO, MgO et BaO, donnent un laitier plus fluide et donc un aspect de cordon moins régulier mais dont les résiliences sont excellentes. Par contre, ils sont très sensibles aux paramètres électriques, ne supportant pas les fortes intensités et ne sont pas favorables à des cordons pénétrants.

II.4.1.b. Rôle électrique

Les composés ont ici pour rôle d'initier ou de stabiliser l'arc électrique. On compte parmi ces éléments des poudres métalliques (nickel ou acier) et des matières minérales comme le

potassium, la silice, le feldspath et le talc qui produisent des ions (Na^+ et K^+) à leur dissociation.

II.4.1.c. Rôle mécanique

Les grandeurs physiques qui conditionnent la morphologie du bain et l'aptitude qu'a le laitier à se détacher vont se modifier. Les oxydes de magnésium, de manganèse, le rutile, l'alumine et la silice en association avec le fluorure de calcium modifient les caractéristiques propres à l'alliage comme la température de fusion, l'intervalle de solidification ou la fluidité du métal liquide. De plus, les caractéristiques de fluidité, de densité et de tension de surface influencent nettement les aspects endroit des cordons et les morphologies de bain.

Comme nous l'avons vu, certains composés jouent plusieurs rôles. Il faudra en combiner les effets et faire des compromis pour aboutir à un produit performant.

On peut noter que, dans le cas des électrodes enrobées, il est conseillé d'utiliser des électrodes à enrobage acide contenant de grandes proportions de silice (SiO_2) ou d'alumine (Al_2O_3) quand on recherche une forte pénétration. Ces enrobages ont la propriété de concentrer l'arc sur une surface plus petite ; par contre, elles doivent être utilisées avec des tensions élevées (de l'ordre de 50V).

II.4.2. Historique du soudage ATIG

C'est le Paton Electric Welding Institute (Ukraine) qui a la paternité de la découverte du procédé ATIG (Flux Activated TIG ou soudage TIG activé par flux).

Ce procédé découle indirectement du développement de flux pour soudage vertical sous laitier d'alliages de titane. GUREVICH et al. ont alors utilisé des composés fluorés alcalins et des terres rares pour modifier les propriétés physico-chimiques du laitier [Ati 5-7]. Il est, entre autre, fait mention de fluorure de calcium (CaF_2) utilisé pour son haut point de fusion.

L'analyse de la zone en fusion montre la présence de fluorures d'hydrogène volatiles (HF gazeux). Ceci a pour conséquence de limiter les porosités au sein du cordon. Ils remarquent également une augmentation de la productivité du procédé (la tension d'arc augmente ainsi que l'énergie incidente).

Les mêmes auteurs présentent une première utilisation de cette découverte avec le procédé de soudage sous flux (arc submergé). Ils modifient les compositions des flux car de l'utilisation de fluorures rend l'arc instable. Les études de MARYA et Le MAITRE sur le développement de flux pour le soudage sous flux du titane arrivent aux mêmes conclusions, ils préconisent de remplacer les fluorures par des chlorures qui permettent de stabiliser l'arc [Ati 8]. Il s'avère alors que le facteur de pénétration est amélioré et que l'énergie incidente est diminuée. Cette technique permet d'améliorer le taux de dépôt de métal pour la réalisation de joints soudés en titane.

La seconde utilisation de ces flux est une application en soudage TIG. Déposés en endroit des tôles, ils permettent d'atteindre des épaisseurs soudées nécessitant jusqu'alors des préparations de bords et du métal d'apport. Les énergies incidentes, comme pour le soudage sous flux solide, sont plus efficaces. Il est fait mention de la mise au point d'un flux permettant de réaliser, en une seule passe, 6mm à 220A et 3,5mm à 100A [Ati 9].

Pour le soudage TIG, les auteurs constatent une constriction de la tache anodique qui s'expliquerait par la concentration du canal ionisé (concentration due à l'ajout de flux). Ainsi,

la largeur de bain est réduite alors que la pénétration est augmentée. Les structures de solidification observées sont similaires à celles obtenues en faisceau d'électrons (F.E.).

SAVITSKII et al. ont développé le même type de produit pour les aciers [Ati 10]. Ils s'intéressent tout particulièrement aux structures de solidification résultantes. Le volume fondu (à pénétration identique) est plus petit en ATIG, les structures résultantes vont être plus fines et le risque de fissuration à chaud diminué. De plus, la morphologie du bain conduit à des fronts de solidification aux surfaces tridimensionnelles complexes ne donnant pas d'orientation privilégiée de grain. Ainsi, la solidification du métal fondu est fine et désorientée. Elle est plus proche de la structure initiale du métal de base (ce qui est vérifié par les essais mécaniques réalisés dans le métal fondu et dans le métal de base d'aciers à haute limite élastique).

SAIDOV et MARYA proposent des flux solides appliqués aux alliages d'aluminium, notamment les séries 5000 (aluminium magnésium) [Ati 11-12]. L'innovation est double, d'une part l'utilisation de flux actifs en surface des joints à souder permet de réaliser des pleines pénétration en une passe jusqu'à 8mm, d'autre part, l'utilisation de courants continu rompt avec l'impératif courant alternatif, en soudure TIG d'alliages d'aluminium, nécessaire pour briser la couche réfractaire d'oxyde d'alumine qui se forme en surface du bain à souder.

Il faut pourtant attendre le milieu des années 90 pour trouver un intérêt de la part des industriels pour ce procédé, avec l'émergence de produits commerciaux sur le marché des consommables en soudage. Bien qu'aucune réalisation industrielle n'ait encore clairement utilisé cette technique, la compréhension des différents mécanismes intervenant dans le procédé ATIG est devenue nécessaire.

II.4.3. Interprétations des phénomènes intervenants

LUCAS et al. testent les flux avec des procédés comme le TIG, le Laser et le plasma sur les aciers inoxydables [Ati 13-14]. Ces produits sont composés de fluorures, mais aussi d'oxydes métalliques. Il s'avère alors que les procédés Laser et plasma sont peu sensibles au flux actif.

Pour le soudage Laser, la pénétration est nettement réduite par la création d'un plasma en endroit du keyhole. Ce plasma vient alors absorber une partie de l'énergie qui n'est plus transmise à la pièce.

Dans le cas du soudage plasma, le flux stabilise le keyhole permettant alors de gagner en vitesse opératoire. De plus, la section fondue a une largeur plus régulière ce qui va améliorer la répartition des déformations.

Ces auteurs sont les premiers à proposer une explication de l'effet actif du procédé. Ils interprètent la constriction anodique observée comme le résultat d'une forte interaction entre le flux et les phénomènes de chute anodique. La constriction d'arc résulterait de la formation, en périphérie de l'arc, de molécules neutres et stables, issues de la décomposition du flux.

Cette constriction est identique à ce qui est réalisé physiquement dans le cadre d'une torche plasma. De plus, au centre de l'arc les températures importantes dissocient les molécules créant de nouvelles charges qui vont s'ajouter au flux d'électrons. Par ailleurs, des vapeurs peuvent se recombiner avec des électrons, en périphérie de la colonne ionisée, et diminuer alors le nombre de charges capables de conduire le courant, ceci conduisant à la constriction de l'arc. Le nouvel équilibre thermodynamique de l'ensemble nécessite une énergie supérieure pour stabiliser l'arc donc une augmentation de la tension (cf. Figure II.11).

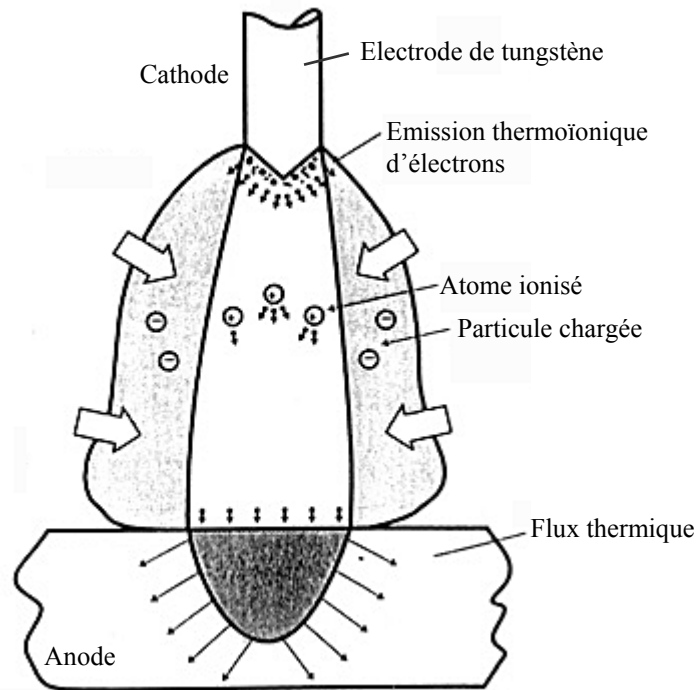


Figure II.11 : Phénomènes de constriction d'arc [Ati 13]

MIDDEL et al. analysent l'effet du SiO_2 sur l'arc TIG comme étant une variable perturbant le procédé de soudage des aciers au carbone [Ati 15]. La tension d'arc est modifiée (avec et sans flux). Cette variation est due à la constriction d'arc, mais aussi, à la création d'une plume d'arc à l'arrière de l'électrode (cf. Figure II.12).

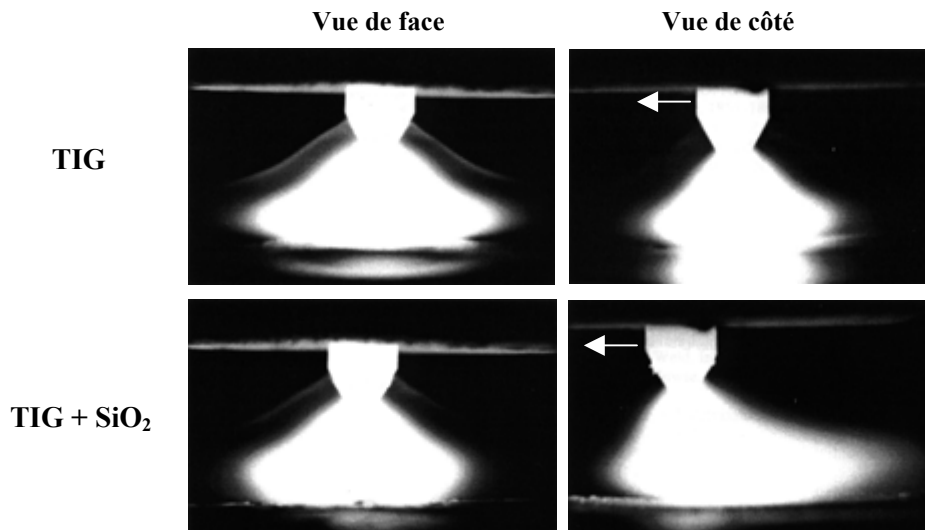


Figure II.12 : Effet du SiO_2 sur l'arc TIG d'un acier inoxydable (vue de face et de côté) [Ati 15]

La hauteur d'arc, si elle affecte la valeur de la tension d'arc, n'influe pas sur le saut de tension en présence de flux. Par contre, en augmentant l'intensité d'arc, le saut de tension diminue (alors qu'il augmente quand la vitesse de soudage croît).

L'arc et son plasma sont alors regardés comme des corps déformables ; plus ils sont volumineux, plus l'énergie qu'ils requièrent pour être stables est importante. L'intensité et la vitesse de soudage vont conditionner la rigidité de l'arc (au sens où le volume ionisé sera plus

ou moins déformable). Cependant, suivant le type de flux testé (oxydes et chlorures), les sauts de tension (avec et sans flux) sont nettement différents et peuvent être de signes opposés.

PRILUTSKY et al. effectuent des analyses spectrales du plasma d'arc, appliqué au titane grade 2, afin d'identifier la position des éléments fluorés du flux ATIG [Ati 16]. Il en ressort que les particules dissociées sous l'arc électrique se retrouvent principalement en périphérie et non dans la colonne d'arc.

Ainsi, des composés stables du type TiF_2 ou TiF_3 formeraient une barrière résistive en périphérie de l'arc. Suivant le fluorure testé, la position de ces composés peut être plus ou moins proche de l'anode. Si nous considérons le cas du fluorure de magnésium, sa présence est importante à proximité de l'anode, l'effet de constriction peut alors être maximal.

PATON et al., quant à eux, affinent les explications concernant les réactions qui interviennent au sein de l'arc [Ati 17-18]. En effet, les réactions de dissociation et de recombinaison des flux contribuent au « refroidissement » périphérique du plasma, améliorant la constriction d'arc. De plus, les composés fluor-titane créés, présentent, semble-t-il, des sections de « piégeage » d'électrons importantes, donnant lieu à la formation d'ions négatifs. Leur concentration, en périphérie de l'anode, force la tache anodique à diminuer sa section.

Ainsi, les propriétés thermo-physiques et physico-chimiques des flux influent grandement sur la constriction possible de l'arc.

Par une mesure de la taille de l'arc, les mêmes auteurs déterminent les densités de courant à la surface du bain de fusion en fonction des différents produits utilisés (cf. Figure II.13). De plus, ils comparent les énergies incidentes entre le procédé TIG et le procédé ATIG. On constate alors, que pour une pénétration donnée, l'énergie incidente ATIG est diminuée par deux (cf. Figure II.14).

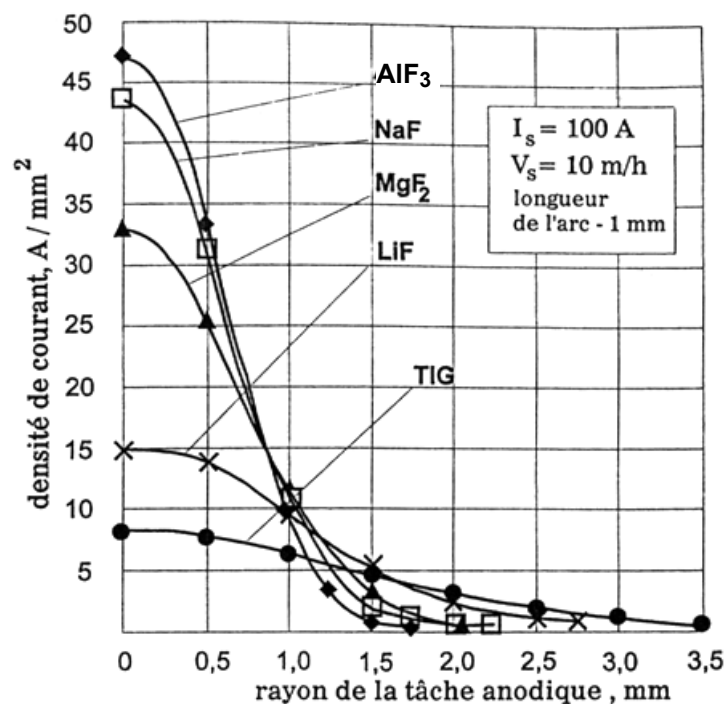


Figure II.13 : Densité de courant en soudage TIG et ATIG, fonction des flux utilisés [Ati 19]

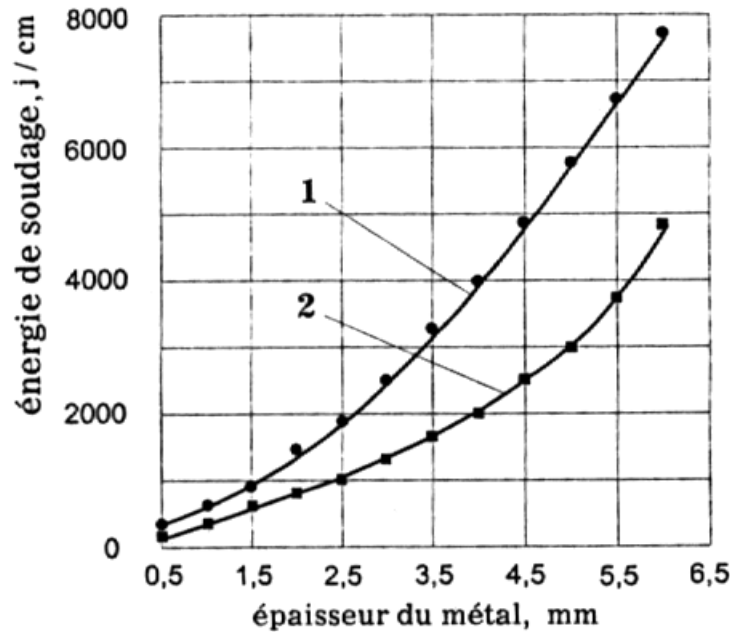


Figure II.14 : Diagramme d'énergie incidente nominale / pénétration pour les procédés TIG (1) et ATIG (2) appliqué au titane grade 2 [Ati 19]

L'effet « déshydrogénisant » des composés fluorés conduit à des taux d'hydrogène inférieurs dans la zone fondue, à ceux obtenus dans le métal de base. De plus, le laitier vitrifié (surplus de flux non consommé de chaque côté du cordon) participe à la protection de la Z.A.T.. Les risques de fragilisation à l'hydrogène ou à l'oxygène sont alors limités, le flux jouant le rôle de piège (à hydrogène ou oxygène).

Suite à ces opérations de soudage, les cordons ne présentent pas de perte de propriétés mécaniques, alors que les composés fluorés sont peu recommandés pour les alliages de titane (risque de fragilisation). Les essais de traction, de résilience et de fatigue à 400°C ne révèlent aucune variation par rapport aux caractéristiques classiques des cordons soudés.

Il y a donc une interaction entre le flux et le métal fondu. SAIDOV et MARYA, pour les soudures d'aluminium en présence de flux, expliquent le rôle désoxydant en surface du bain, qui permet de réaliser les soudures en courant continu [Ati 11-12]. Dans ce cas, comme dans le cas précédent, le rôle du flux est double, améliorant la pénétration des cordons soudés et raffinant le bain ou sa surface fondue pour améliorer l'opération de soudage en elle-même et pour conserver les propriétés mécaniques finales.

ANDERSON et al. ont, pour leur part, étudié l'influence des gaz d'assistance sur le soudage ATIG des aciers inoxydables (optimisations classiques utilisant de l'hélium et de l'hydrogène) [Ati 19]. L'ajout d'hélium conduit à des gains en pénétration identiques entre le soudage TIG et ATIG. Les vitesses de soudage peuvent alors être augmentées de 33%. L'utilisation d'hydrogène, s'il est efficace en soudage TIG, favorise en ATIG la formation de macro porosités inacceptables mécaniquement.

PASKELL et al., quant à eux, comparent les effets d'un flux ATIG pour les aciers inoxydables sur huit coulées d'acier inoxydable austénitique 304 différentes de 6,35mm d'épaisseur [Ati 20]. Les variations en composition de chaque coulée conduisent à des soudabilités radicalement différentes (ratio P/L variant de 0,3 à 0,8). Alors que le meilleur cordon TIG a une pénétration de 5mm, tous les cordons ATIG sont pleinement pénétrant avec une largeur endroit et envers de cordon sensiblement égales. L'analyse chimique du métal fondu ne révèle aucune modification par rapport au cordon soudé TIG, ni au métal de base.

Les caractéristiques mécaniques et radiographiques du cordon sont également conformes aux réalisations soudées en TIG.

II.4.4. Flux ATIG - composition et produits commerciaux

Ce n'est qu'au milieu des années 90 que commencent à apparaître les premiers produits commerciaux, pour la plupart issus des formulations du Paton Electric Welding Institut.

LUCAS et al. donnent une composition pour l'application aux aciers au carbone stabilisé manganèse : 57,3% d'oxyde de silicium (SiO_2), 13,6% d'oxyde de titane (TiO_2), 13,6% de poudre de titane, 9,1% d'oxyde de chrome (Cr_2O_3) et de 6,4% de fluorure de sodium (NaF). Ils indiquent aussi que ces produits, développés pour améliorer l'efficacité de pénétration du TIG, améliorent aussi les propriétés mécaniques des cordons soudés [Ati 13-14].

PRILUSTKY, lui, ne donne pas la composition du flux du titane, mais étudie l'influence de différents composés fluorés que sont le fluorure d'aluminium, de sodium, de lithium et de magnésium [Ati 16].

L'ensemble des produits proposés présente pourtant trois inconvénients majeurs :

- une grande sensibilité aux variations de distance électrode-pièce qui diminue l'efficacité du procédé,
- une tenue de bain délicate
- la présence d'un laitier post opératoire souvent très difficile à éliminer.

Ainsi, le soudage ATIG se retrouve limité à une utilisation automatique où les hauteurs d'arc seront régulées et maintenues courtes, ce qui vient diminuer la flexibilité de ce procédé.

De plus, les techniques de dépôt des flux avant opération restent très artisanales car aucun distributeur n'a encore proposé de solution autre qu'un dépôt par pinceau, après mise en suspension du flux dans un solvant volatil.

II.5. Bilan

Nous venons de voir les deux principales limites du soudage TIG. D'une part, la densité d'énergie au sein de l'arc est relativement faible, d'autre part, les matériaux à assembler, de plus en plus raffinés, conduisent à des soudabilités réduites, élargissant le volume fondu au détriment de sa pénétration.

Augmenter la densité de chaleur au sein de l'arc permet d'améliorer la pénétration du cordon TIG ; on cherche alors à réaliser une constriction de la colonne ionisée et de la tâche anodique. Or, l'optimisation des paramètres de soudage TIG ne permet pas de donner des solutions satisfaisantes dans le cas d'épaisseurs importantes (supérieures à 3mm).

Pour ce faire, l'énergie spécifique de l'arc va être concentré par le biais des géométries d'électrodes (composition, type d'affûtage, inclinaison) et de l'utilisation de mélanges gazeux (argon-hydrogène ou argon-hélium). Mais les gains en pénétration obtenus par ces méthodes restent relativement faibles, n'augmentant les possibilités actuelles du soudage TIG que dans des proportions limitées.

Il faut donc s'orienter vers l'utilisation d'autres procédés ou la réalisation d'usinages des bords à souder avec métal d'apport.

Ainsi, la technique ATIG se positionne comme une alternative entre le soudage TIG et le soudage plasma. L'intérêt de cette technique est double ; d'une grande simplicité d'emploi, elle ne nécessite aucun investissement en matériel et permet d'offrir une solution pour des épaisseurs allant jusqu'à 7mm en diminuant considérablement les énergies incidentes par la réduction du nombre de passes.

Cette technique reste pourtant suspecte aux yeux des soudeurs car elle est encore peu formalisée sur le plan des mécanismes d'activation. Elle est surtout particulièrement délicate à mettre en œuvre avec les formulations présentes sur le marché. L'opérateur est alors contraint d'utiliser un procédé automatique gérant des longueurs d'arc très courtes et de travailler avec une plage de paramètres opératoires réduite.

Pour convaincre les utilisateurs potentiels, cette solution nécessite une étude de ses effets tant au niveau de la source thermique que du bain fondu pour lever enfin voile de mystères entourant les flux d'activation.

