LA SOUDURE A L'ARC ÉLECTRIQUE DES CONDUITES FORCÉES

ARC WELDING OF PENSTOCKS

H. REY,

Ingénieur A. et M. et E.S.S.A.

English synopsis p. 225

C'est en 1932, que fut aménagée la conduite forcée de la chute d'Eylie (Ariège) ⁽¹⁾. Cette conduite forcée de 1.050 m. de hauteur de chute, de diamètre variant de 1.000 à 800 mm., construite par les Etab^{ts} Bouchayer et Viallet, et montée par la Société Dauphinoise d'Etudes et de Montages, fut la première réalisée en France par soudure, tant à l'usine qu'au chantier.

Ce ne fut pas sans grandes précautions techniques et même morales : essais, contre essais, radios, sondages, prélèvements d'éprouvette sur tuyaux mis en place, permirent à ce travail de s'effectuer avec un total succès, démontrant ainsi ce que l'on pouvait attendre de l'utilisation de ce procédé de construction.

Depuis cette époque, la soudure à l'arc électrique, déjà largement utilisée en Amérique, et plus timidement en Suisse, fut, en matière de

conduites forcées, complètement admise en France.

Les précautions prises actuellement, sont toujours aussi sévères, quoique l'expérience acquise, l'habileté des soudeurs et de la maîtrise, semblent permettre des contrôles moins sévères (fig. 1).

Les expériences faites au cours du montage de la conduite du Portillon (1.413 m. de chute, diamètre 1.200 à 850 mm.) en plein hiver, sur des tôles d'acier au Cr. Cu à 54 kg., l'essai accidentel de la conduite d'Izourt (fig. 2) sur des tôles d'acier identiques, qui, prise en travers par une avalanche, fut déportée de 1 m. 25 sur 125 m., une surpression considérable ayant ainsi été déterminée au surplus, sans amener d'interruption de service, ont prouvé qu'on pouvait poursuivre avec confiance, par cette méthode moderne et économique, la fabrication et le montage des conduites forcées.

Les problèmes posés par le procédé de jonction à l'arc électrique concernant :

- 1) La liaison homogène du joint, qui de par la nature des électrodes utilisées, peut être difficile à obtenir d'une façon rigoureuse.
- 2) L'étude des effets mécaniques et thermiques dus à l'exécution des soudures.
- 3) La réalisation de soudures, capables de donner toutes garanties physiques, mécaniques, et d'étanchéité.

Nous les étudierons du seul point de vue qui nous intéresse : celui des conduites forcées soudées à l'arc électrique en usine, et sur les chantiers en montagne.

ÉTUDE D'UNE LIAISON HOMOGÈNE :

L'opération de soudure consiste en l'apport d'un métal, rendu liquide par fusion, dans un

fig. 1

Soudeur au travail.

(1) Voir page 263.

fig. 2 Conduite d'Izourt après l'accident.

moule constitué par les bords des pièces à souder. Cette opération diffère de celle de la fonderie, par le fait que les bords du moule participent à cette fusion en fondant eux-mêmes.

La liaison ainsi assurée, il reste à en réaliser l'homogénéité. S'il est assez commode d'obtenir une continuité physique, dans une soudure correctement exécutée, il est impossible de réaliser une même continuité chimique dans le joint.

Il est peu de sujets qui aient donné lieu, depuis plusieurs décades, à autant de recherches scientifiques. Les facteurs qui interviennent sont trop divers, et agissant simultanément les uns sur les autres, ne permettent pas de prévoir le résultat final obtenu dans le joint réalisé.

1°) La composition chimique est définie pour le métal de base, comme pour le métal déposé, par l'analyse. Le métal fondu est un mélange des deux. Sa composition varie suivant la situation du point considéré, elle est fortement influencée par les impuretés non définies, du métal d'origine, ou des apports extérieurs introduits au cours de la fusion.

2°) La constitution physico-chimique est définie par la nature des constituants propres au métal (perlite, ferrite, etc.) fig. 3. Du fait des températures atteintes, qui provoquent en somme un traitement thermique, des conditions dans lesquelles le refroidissement s'effectuera, cette nature variera avec les points considérés.

3°) La structure, c'est-à-dire l'architecture interne des éléments, prend naissance lors de la solidification et dépend des circonstances thermiques, et mécaniques de celle-ci.

A ces trois principaux facteurs, s'ajoutent les phénomènes de localisation de l'opération de fonderie, qui provoquent des phénomènes mécaniques, tels que tensions internes, retraits ou déformations.

L'énoncé de ces phénomènes, indique, d'ores et déjà, les précautions nécessaires à prendre pour obtenir une bonne réalisation.

Les aciers utilisés dans la construction des conduites forcées, sont tous soudables au sens strict du mot, il peut cependant en être autrement, au sens que nous y attachons. Nous pensons en effet, qu'un acier est soudable, lorsque les caractéristiques physiques et mécaniques du métal, constituées dans la zone de soudure, sont sensiblement égales à celle du métal de base.

Toutes les électrodes ne conviennent pas à n'importe quel support, ainsi une électrode en acier doux du type E. 40 sur une fonte, en se carburant, donnera des points durs, incompatibles avec l'effet recherché. Il est d'autre part nécessaire de protéger efficacement le métal en fusion, pour éviter le contact avec les éléments de l'atmosphère environnante (oxygène ou azote). Il faut aussi prévoir les efforts internes, les déformations qui se produiront, et leur élimination avant et après soudure.

Vue d'ensemble de la conduite d'Eylie. Chute brute 1.050 m.
(Cliché Alix, Bagnères-de-Bigorre)

fig. 3

Micrographie d'acier doux.

PHÉNOMÈNES ACCOMPAGNANT LA SOUDURE

Ces phénomènes sont de deux sortes :

Les phénomènes locaux, qui affectent les propriétés spécifiques de la matière aux points considérés.

Les phénomènes globaux résultant de l'hétérogénéité thermique de l'ensemble.

PHÉNOMÈNES LOCAUX

A leur sujet, il y a lieu de distinguer 3 zones (fig. 4) :

Une zone de fusion totale.

Une zone de fusion partielle.

Une zone de chauffage sans fusion.

zones pour lesquelles, il suffit d'énoncer les phénomènes possibles, sans pour cela qu'ils soient tous apparents, et surtout distincts au cours de la durée de l'opération.

fig. 4

SS' Zones de surchauffe sous fusion.
FF'F Zone de fusion.

Au cours de l'**échauffement** dans la zone de chauffage sans fusion, on peut observer les phénomènes de recuit, qui peuvent provoquer la disparition d'un état de trempe ou d'écrouissage,

la formation d'un grain grossier, la modification de certaines propriétés du métal.

Dans la zone de fusion partielle, les phénomènes sont identiques avec une accentuation du phénomène de surchauffe, une accumulation d'éléments nuisibles, plus fusibles dans les portions liquides, déterminant en général une zone de moindre résistance.

Dans la zone de fusion totale, on assiste à des transformations de l'alliage, à des absorptions de gaz, ou à la volatilisation d'éléments. On peut alors remarquer : une carburation des aciers, une oxydation pendant la fusion du métal, une absorption, ou un dégagement de gaz dans le métal fondu, l'inclusion d'impuretés nuisibles apportées par une électrode de mauvaise qualité.

Pendant le **refroidissement**, il apparaîtra dans la zone fondue, une cristallisation nouvelle, avec possibilités de formation de martensite (trempe), et l'inclusion de gaz dissous, ou prenant naissance après réaction chimique, des éléments en solution (nitrures ou piqures). La structure nouvelle dépendra de l'état du métal de base, comme de la température atteinte, et de la vitesse de refroidissement.

Dans les zones avoisinantes, il peut y avoir des phénomènes similaires dans le métal obtenu, ainsi que des trempes qui sont d'autant plus à craindre, que le refroidissement sera plus rapide.

Il faut se rendre compte, qu'il y a plus un phénomène de quantité de chaleur à fournir, qu'une valeur absolue des températures ambiantes. Il faut considérer que la masse représentée par le tuyau est énorme, et sert de condensateur de froid, comme de chaleur. Aussi, pour certains aciers et en période froide, il est quelquefois bon, sinon de réchauffer complètement la pièce, du moins les abords de la soudure, avant de commencer cette opération.

L'existence de ces phénomènes nous a conduits à faire des essais en montagne, afin de connaître l'influence des basses températures de l'air ambiant, et surtout des variations importantes des températures diurnes et nocturnes (fig. 5).

Une structure grossière peut être modifiée par un martelage local, ou par des recuits adaptés à la nature du métal de base, qu'il est difficile et onéreux d'envisager sur un chantier de montage.

fig. 5 Essai de soudure en altitude (2.000 m.).

PHÉNOMÈNES GLOBAUX

Par suite de la localisation du chauffage, par fusion, on constate des variations dues aux contractions et à la solidification des molécules constituant le bain de fusion.

Ces phénomènes, tous de même origine, peuvent se classer ainsi :

Les déformations qui entraînent des modifications de l'ensemble et qui peuvent se combattre par des déformations préalables.

Les tensions internes, dont il est difficile de connaître à priori, l'importance et la localisation.

Les fissures, qui sont un résultat visible des tensions internes et qui, par leur risque de rupture, compromettent la solidité de l'ensemble.

S'ils dépendent de la localisation des températures élevées et par suite des refroidissements, ils sont aussi liés à la déformabilité de l'ensemble, à la conductibilité des métaux en présence, aux déformations préalables, au mode d'assemblage, et à la position de la soudure.

L'OPÉRATION MÉTALLURGIQUE

Elle est due aux réactions d'ordre chimique, qui peuvent s'effectuer entre le métal d'apport fondu, et le milieu environnant : métal de base, laitier ou fondant, atmosphère du milieu. Cette opération est essentielle. Elle intervient principalement dans l'étude de l'électrode, qui par son laitier protecteur, agit comme un fondant métallurgique.

L'enrobage de l'électrode a, en effet, pour but :
— de diriger, et de stabiliser l'axe par une atmosphère conductrice.

— de protéger le métal, contre l'atmosphère oxydante de l'air.

— d'épurer le métal en le désoxydant (Mn — Si — Al — Ti) en le désulfurant (Mn) en le déniturant (Al — Ti).

— d'incorporer dans le métal des éléments améliorants.

Ce rapide aperçu des phénomènes dus à la soudure, permet de définir les conditions à réaliser et les précautions à prendre en vue de la réalisation pratique des joints.

L'ensemble de ces considérations, concerne principalement les travaux de grosse chaudronnerie en atelier et sur chantiers (conduites forcées plus particulièrement).

LA RÉALISATION DES SOUDURES

La préparation des pièces doit satisfaire à deux buts principaux :

Permettre l'exécution d'une soudure avec un minimum d'échauffement, tout en assurant une continuité parfaite dans la liaison ; remédier aux déformations provoquées par l'échauffement.

La forme du chanfrein permettra de laisser pénétrer l'électrode jusqu'au cœur du métal d'une façon commode. Il aura 60° pour les soudures en ateliers, et 40° pour les soudures de chantier, réduction rendue possible par l'utilisation d'électrodes plus petites.

Dans un but d'économie de main-d'œuvre, nous préconisons pour les soudures de chantier, l'exécution sur appui.

La préparation mécanique des chanfreins est à surveiller. Toute opération de cisailage, de coupage au chalumeau, peuvent être à l'origine de fissures, qui sont autant d'amorces de cassure.

fig. 6

Formes des chanfreins.

Le jeu laissé entre les lèvres des chanfreins est fonction du retrait transversal obtenu, ce jeu est de l'ordre de 3 à 4 mm. suivant les conditions d'exécution des soudures.

La soudure sur éléments cylindriques répartissant assez bien les efforts de déformations, il n'est pas en général nécessaire de prévoir de montages spéciaux avant soudure des tuyaux. Cependant, dans le cas des brides ou des accessoires, il faut prévoir des déformations préalables, destinées à compenser les effets du retrait. Il est aussi réservé un dernier usinage, après l'arrondissement des éléments de tuyaux une fois soudés.

La conception de la soudure a un rôle important dans la préparation. Il faut dans la limite des conditions de bonne résistance d'une pièce, éviter qu'il y ait des points trop fatigués voisinant avec des zones de moindre fatigue. Il faut graduer harmonieusement les épaisseurs, pour assurer un écoulement des tensions sans concentration anormale, risquant d'amener une rupture aux moindres surcharges. Il faut s'assurer que la reprise de la soudure est toujours possible. Il faut connaître la valeur du cordon de soudure à réaliser, une surcharge de soudure étant aussi dangereuse qu'une insuffisance.

Le pointage avant soudure, doit être fait avec beaucoup de précaution, afin d'assurer une exécution correcte du joint.

Un recuit est à faire sur toute virole, dont l'épaisseur est supérieure à 1 % du diamètre. Cette sécurité est suffisante pour éliminer les tensions internes dangereuses pour la bonne tenue du tuyau. Ce recuit doit être généralisé, pour toutes pièces chaudronnées, dont la forme peut donner naissance à des tensions mal définies.

Il s'agit d'annuler autant que faire se peut, les tensions internes. Un revenu à 625° est suffisant pour à la fois éliminer la tension et donner au grain de l'acier un aspect plus normal. Evidemment, cette chauffe devrait logiquement être poussée jusqu'à la température de recuit convenant à l'acier de base.

Mais les risques de déformation de la pièce, les irrégularités de chauffage et de refroidissement sont à apprécier, et il n'est pas dit d'avance, qu'une pièce après cette opération, s'en trouve améliorée.

Le choix du métal :

Il y a là toute la question de la notion de soudabilité. Il faut chercher à définir, et à qualifier les résultats de l'opération, c'est-à-dire l'aptitude d'un métal à fournir une bonne soudure.

Une bonne soudabilité est à exiger du métal de base, plus que du métal d'apport. Seul le métal de base est en fait, réalisé sans tenir compte a priori des conditions dans lesquelles il sera soudé. La grande variété existante des électrodes, permet de trouver celles qui conviennent au métal considéré ; encore faut-il que celui-ci soit susceptible de supporter les divers phénomènes que nous avons décrits plus haut.

Le choix de l'électrode, se fait par l'étude du joint soudé, par les essais mécaniques suivants : traction, pliage, résilience. Une étude micrographique permet de juger de la nouvelle structure du joint. Un cliché radiographique indique la valeur du joint. L'essai dit Dutilleul permet de déterminer le bon comportement après soudure du métal de base, par sa sensibilité au phénomène de décohésion décrit par M. Dutilleul, phénomène qui peut provenir aussi bien de la nature du métal lui-même, que de sa texture de laminage (doublure - feuilletage).

Il peut être admis qu'une électrode soit choisie volontairement plus douce, pour être assuré que le joint sera lui-même plus doux et de ce fait moins sensible aux effets de trempe à l'air. Dans le cas des soudures transversales, où la fatigue est moindre, ce procédé est souvent utilisé.

Il faut reconnaître qu'actuellement la majorité des aciers utilisés en chaudronnerie, sont soudables sans précaution spéciale. La qualité des électrodes est plus délicate, et celles-ci nécessitent toujours un essai soigneux, avec l'exigence d'un maximum de garantie dans l'homogénéité de la livraison.

Les éléments essentiels à considérer dans ce cas sont le carbone, le manganèse, les impuretés inhérentes au métal : soufre et phosphore.

La Méthode de soudure :

C'est la manière dont est exécuté le remplissage du chanfrein, plus que les conditions dans lesquelles s'exécute la soudure qui importe. L'exécution de nombreuses pièces de chaudronnerie exige fréquemment de la part des soudeurs la possibilité de faire une soudure dans n'importe quelle position, et avec les mêmes qualités de fini et de sécurité. Un bon soudeur doit pouvoir exécuter sans gêne une soudure aussi bien à plat, qu'une soudure verticale ou au plafond (fig. 7).

La controverse tient plutôt dans la manière de remplir le chanfrein. Il est certain qu'un chanfrein rempli avec un minimum de passes, présente une économie de main-d'œuvre et

fig. 7

Soudeur au travail.

d'électrodes. Mais nous ne sommes pas convaincus que ce procédé présente une sécurité suffisante. Remplir un chanfrein avec trois fois moins de passes à l'aide d'une électrode de gros diamètre, et une intensité élevée, est pour nous une erreur, car afin d'assurer dans ce cas, une pénétration à cœur, il faut assurer au moment de la fusion, un bain de soudure important et très chaud (1.500 à 1.700 degrés) qui provoque en plus des inconvénients dus à cet échauffement énorme, une volatilisation de laitier, et une détérioration de l'enrobage au détriment du laitier. Le métal en fusion se charge d'oxydes et de nitrures. Le contrôle radiographique décèle des inclusions gazeuses, l'analyse micrographique confirme une texture de surchauffe ou de trempe qui ne font qu'accroître la fragilité du joint.

Macrographie indiquant le nombre de passes.

fig. 8

Nous préférons, quant à nous, la méthode à passes multiples (fig. 8) qui assure une texture du grain beaucoup plus homogène par suite de l'auto-recuit des cordons les uns par les autres, et des tensions moins importantes du fait d'un échauffement moindre.

Il faut remarquer, que la méthode de soudure automatique (Union Melt par exemple) ne présente pas les mêmes inconvénients. Le métal est recouvert d'un gros enrobage qui crée un laitier important recouvrant toute la soudure. La longueur de l'Arc est constante et autoréglée, ce qui évite tout contact avec l'atmosphère oxydante. La vitesse d'avance est telle, qu'il n'y a pas de localisation des fortes températures.

Nous restons persuadés que la valeur des travaux de soudure que nous exécutons, est essentiellement due à notre persévérance à employer une méthode que beaucoup considèrent comme désuète. Mais l'habileté de l'opérateur

est extrêmement importante. Ce n'est qu'après une longue préparation (près de 3 ans pour un ouvrier normal) que nos soudeurs acquièrent les qualités et l'expérience qui font qu'ils exécutent, en tournant autour des tuyaux, des soudures d'aspect et de qualité remarquables. Les contrôles sévères qu'ils subissent de notre part d'abord, de celle du maître de l'œuvre ensuite, garantissent une sécurité totale. Toute défaillance est possible, aussi notre contrôle et notre surveillance sont-ils de chaque instant.

Ces contrôles sont exécutés par la maîtrise qui doit avoir en conscience, le souci permanent de la vérification des réglages des postes, de la longueur de l'arc, de la fusion des électrodes, du nettoyage après chaque passe. Les autres contrôles venant après l'exécution de la soudure ne sont en fait qu'une confirmation des résultats obtenus. Ils sont parfois destructifs, mais qu'ils soient d'ordre mécanique, ou radiographique,

l'interprétation des résultats qu'ils fournissent pose un problème délicat dont seule l'expérience peut définir les normes.

En matière de chaudronnerie en général et de conduites forcées en particulier, en usine et sur les chantiers, la soudure à l'arc électrique a fait ses preuves. C'est un procédé d'assemblage économique, pratique et simple dans son utilisation, à condition de respecter les conditions définies et de prendre les précautions nécessaires à sa réalisation. Le procédé ne s'accommode pas de médiocrité. Il exige, de la part de l'ingénieur qui l'étudie, et de l'ouvrier qui l'exécute une conscience professionnelle, et une recherche du mieux dans lesquelles il faut trouver les raisons du succès.

C'est sans doute, parce que nous nous sommes toujours strictement conformés à ces règles, que nous n'avons jamais connu de déboires... Mais veillons à ce qu'il en soit toujours ainsi !

Deux procédés unis.

(Clichés S. D. E. M.)