

MÉTHODES ET PRATIQUES DE L'INGÉNIEUR

TECHNIQUES INDUSTRIELLES

Stéphane LECLERC

Guide de soudage automatique et mécanisé

**Analyse de cas industriels
État de l'art du soudage
auto-adaptatif
et apport de l'IA**

Editions TECHNIP

Collection
MÉTHODES ET PRATIQUES DE L'INGÉNIEUR

TECHNIQUES INDUSTRIELLES

Stéphane Leclerc

Expert en soudage, ingénieur soudeur ESSA (EWE)
et ingénieur CESI

Guide de soudage automatique et mécanisé

**Analyse de cas
industriels. État de l'art
du soudage auto-adaptatif
et apport de l'IA**



Editions TECHNIP 5 avenue de la République 75011 PARIS

Couverture : STDI
Maquette : Catherine Kédemos
Edition : Nathalie Loiseau



Ce logo a pour objet d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, tout particulièrement dans le domaine technique et universitaire, le développement massif du « photocopillage ». Cette pratique qui s'est généralisée, notamment dans les établissements d'enseignement supérieur, provoque une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que la reproduction de l'ouvrage, partielle ou totale, la vente sans autorisation ainsi que le recel sont passibles de poursuites. Les demandes d'autorisation de photocopier doivent être adressées directement à l'éditeur ou au Centre français d'exploitation du droit de copie.

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

Toute représentation, reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Par ailleurs, la loi du 11 mars 1957 interdit formellement les copies ou les reproductions destinées à une utilisation collective.

© Editions Technip, Paris, 2026.

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7108-1205-0

ISSN 1152-0647

Présentation de la collection

Fondée et historiquement dirigée par le professeur **Pierre Borne**, alors directeur de l'École Centrale de Lille, la collection « **Méthodes et Pratiques de l'Ingénieur** » a longtemps constitué une référence incontournable dans le paysage de la littérature technique et scientifique.

Aujourd'hui, les **Éditions Technip** relancent cette collection emblématique afin de répondre aux nouveaux défis industriels et technologiques. Ce renouveau s'inaugure avec la parution d'un premier ouvrage : le « **Guide de soudage automatique et mécanisé** ».

Fidèle à son ambition d'origine, la collection s'adresse aux élèves ingénieurs, aux étudiants de licence et master, ainsi qu'aux professionnels (ingénieurs et techniciens) souhaitant actualiser ou approfondir leurs connaissances. Elle repose sur trois engagements majeurs :

- **Rendre accessibles** aux non-spécialistes les méthodologies et procédés de référence ;
- **Offrir un état de l'art** des développements récents propres à chaque discipline ;
- **Privilégier l'application pratique** et l'expérimentation sur le terrain en lien avec les avancées technologiques.

Cette collection couvre un large spectre thématique, avec ses sous-collections Automatique, Électrotechnique, Informatique, Mathématiques , et nouvellement Techniques industrielles, elle explore continuellement de nouveaux sujets.

Préface

Stéphane m'a demandé de rédiger la préface de cet ouvrage. Outre une marque de confiance qui m'honore, j'y reconnais la volonté commune de transmettre, après une longue carrière (pas encore tout à fait terminée pour moi) entièrement consacrée au soudage et à son environnement, dans une situation industrielle où la maîtrise technique doit constamment progresser pour répondre aux enjeux de sécurité, de qualité et de performance. Malgré les différences de nos industries respectives, nous partageons un même contexte : des vies, des risques majeurs dépendent de nos soudures et parfois, de nos décisions. La rupture de nos fabrications lors du service n'est pas une option. L'immobilisme non plus, et nous, nous devons faire toujours mieux. Pour l'ingénieur soudeur, cela veut dire plus fiable, plus prédictible, moins cher et avec moins d'empreinte pour notre monde.

L'automatisation du soudage occupe aujourd'hui une place centrale dans cette évolution. En supprimant une grande partie de la variabilité inhérente au soudage manuel, elle permet d'atteindre une répétabilité traçable, mais aussi d'optimiser les règles de conception. Grâce à des paramètres parfaitement maîtrisés et reproductibles, les marges de conception liées à la variabilité intrinsèque au soudage manuel peuvent être ajustées avec davantage de confiance, ouvrant la voie à des assemblages plus robustes, plus fiables et parfois plus légers. Cette précision accrue devient un atout majeur pour les ingénieurs, pour les nouveaux projets, comme pour les exploitants lors des extensions de durée de vie ou les analyses d'incidents.

L'autre force de l'automatisation réside dans sa capacité à réduire les risques auxquels sont exposés les soudeurs, qu'ils soient associés à l'environnement de travail (irradiation, contamination, espace confiné, sous-marin...) ou propres au soudage (fumées, rayonnements, postures, chaleur). En cela, l'automatisation améliore la sécurité et contribue à renforcer l'attractivité des métiers du soudage : elle valorise le rôle de l'opérateur, qui se recentre sur des tâches de préparation, pilotage et optimisation. La profession gagne en technicité et en reconnaissance.

Ce guide rassemble de manière structurée et pragmatique des années de pratiques, d'essais et de retours terrain. Il offre au lecteur une synthèse claire des paramètres clés, et des exigences nécessaires pour mettre en œuvre des procédés automatisés, performants et fiables. Il s'adresse autant à celles et ceux qui souhaitent découvrir l'automatisation qu'aux experts désireux d'affiner leurs pratiques. De même, il clarifie le besoin pour le soudage automatique de s'affranchir des aléas inhérents au soudage – comme les défauts d'accostage des composants ou les variations de mouillabilité d'un bain de fusion, qu'un soudeur manuel expérimenté peut intégrer en temps réel, à la différence d'un robot. Dans ce contexte,

l'apport de l'IA appliquée au soudage et le soudage auto-adaptatif constituent une perspective prometteuse au développement du soudage automatique.

Cet ouvrage est un support utile, durable et pratique pour tous les professionnels du soudage. Il participe à la diffusion d'une culture de rigueur, d'innovation et de maîtrise, et il accompagne la transition vers un soudage plus sûr, plus prévisible, et résolument tourné vers l'avenir.

Bonne lecture !

Jean-Michel AUBERT

Expert en soudage et CND (Ingénieur IWE
– MSc Mechanical Engineering) – TotalEnergies

Sommaire

Remerciements	7
Préface	9
Avant-propos	11
Objet	11
Domaine d'application	12
Documents de référence et livrables	12
Documents de référence	12
Documents EDF	13
Documents fournisseurs	13
Autres documents	13
Liste des figures et tableaux	17
Acronymes et terminologie	19
Acronymes	19
Terminologie	21
Introduction	23
Chapitre 1 ■ REX soudage mécanisé/automatisé	25
1.1 Soudage orbital de tuyauterie	25
1.1.1 Soudage TIG	25
1.1.2 Soudage MIG/MAG	32
1.2 Soudage sous eau	32
Chapitre 2 ■ Soudage orbital de tuyauterie	35
2.1 Rappel des principes du soudage TIG	36
2.2 Paramètres essentiels et paramètres influents du soudage TIG (orbital)	36
2.2.1 Analyse comparative des DMOS TIG orbital produits par les industriels	38
2.2.2 Résultats de l'analyse comparative des DMOS	44
2.3 Technique de soudage TIG orbital autogène ou avec métal d'apport	45
2.3.1 Soudage TIG orbital autogène	45
2.3.2 Soudage TIG orbital avec insert fusible	47
2.3.3 Soudage TIG orbital avec fil d'apport - Généralités	49
2.3.4 Spécificités du soudage TIG orbital avec fil froid	50
2.3.5 Spécificités du soudage TIG orbital avec fil chaud	51

2.4	Sens de progression du soudage TIG orbital	51
2.4.1	Soudage en rotation orbitale sur 360°	51
2.4.2	Soudage en double verticale montante	53
2.4.3	Soudage en double verticale descendante	54
2.5	Soudage TIG en mode lisse ou pulsé	54
2.5.1	Soudage TIG CC	55
2.5.2	Soudage TIG CC pulsé.....	56
2.5.3	Soudage TIG CA.....	59
2.5.4	Rappel sur le fonctionnement de la chaîne AVC (<i>Arc Voltage Control</i>)	59
2.6	Type de chanfrein.....	61
Chapitre 3 ■ Soudage auto-adaptatif – apport de l’IA.....		65
3.1	Soudage auto-adaptatif (SAA).....	65
3.1.1	Principes.....	65
3.1.2	REX international/État de l’art.....	66
3.1.3	Focus sur TIGORA	68
3.2	Apport de l’IA en SAA	76
3.2.1	État de l’art de l’IA en soudage	76
3.2.2	Attentes vis-à-vis de l’IA en SAA	81
Chapitre 4 ■ Conception d’une solution soudée : éléments clés (<i>key items</i>) et méthodes.....		83
4.1	Analyse de cas.....	84
4.1.1	Présentation de la méthode.....	84
4.1.2	Analyse du projet « Remplacement des guides de grappe des assemblages combustibles-réacteurs REP » – Société : Comex Nucléaire (2005-2007).....	85
Chapitre 5 ■ Guide au développement d’un procédé de soudage robuste		91
Conclusion.....		95
À propos de l’auteur		97
Index.....		99

Introduction

Pour rappel, le soudage consiste à assembler deux pièces avec ou sans apport de métal en créant une liaison métallique entre les deux parties, à la différence du brasage ou du collage.

Les premières applications du soudage remontent à l'Antiquité, et sa mise en œuvre était réalisée par voie manuelle : la qualité de la soudure repose sur le savoir-faire du soudeur (soudabilité opératoire) et ses connaissances des matériaux et des lois de la physique (soudabilité métallurgique et soudabilité globale), acquises par l'expérience et la pratique. Le facteur humain constitue le facteur principal de la qualité de la soudure.

La révolution industrielle a tenté de remplacer l'homme soudeur par la machine pour augmenter la productivité, la fiabilité/répétabilité du procédé, et réduire la problématique des ressources humaines compétentes : il faut plusieurs années pour former un soudeur compétent, alors qu'une machine peut être pilotée par un opérateur polyvalent « presse-bouton » sachant lire et écrire, ne requérant pas de compétences particulières en soudage. Cette vision de l'opérateur soudeur, réductrice à mon sens, est encore largement répandue dans l'industrie, et revient sur le devant de la scène avec l'explosion de l'IA.

En éléments de contexte, il y a lieu de considérer les problématiques d'hygiène et sécurité, l'impact du soudage sur la santé et la pénibilité qui nuisent aussi à l'attractivité du métier de soudeur manuel : l'automatisation et la robotisation permettent ainsi de limiter ces effets.

Les premières applications du soudage automatisé étaient liées davantage aux difficultés, voire à l'impossibilité d'accès, qu'à la productivité et à la qualité.

De même, il est important de noter que le passage du soudage manuel au soudage mécanisé/robotisé doit être analysé dans son ensemble, en considérant les impacts sur les phases amont et aval (choix du type de chanfrein, usinage des chanfreins, accessibilité des têtes de soudage, formation, contrôles non destructifs des soudures, maintien en conditions opérationnelles des équipements et des opérateurs).

Un des objectifs du présent document est de mettre en lumière les fondamentaux du soudage mécanisé/robotisé afin d'aider le concepteur de solution soudée dans ses choix.

REX soudage mécanisé/automatisé

Sans que cela ne constitue un inventaire exhaustif des applications du soudage mécanisé/automatisé, j'ai extrait ci-après un échantillon d'applications de soudage dans le domaine nucléaire avec des procédés spéciaux présentant différents stades de mécanisation en milieu irradiant, en air ou sous eau.

1.1 Soudage orbital de tuyauterie

1.1.1 Soudage TIG

Soudage TIG autogène

- ▶ **soudage TIG orbital de lignes de refroidissement du réacteur ITER (1992-1994,CXN)** : soudage TIG orbital automatique par porteur interne, $\varnothing$ 50 mm $\times$ ép. 2 mm, nuance 304L/316L, position PK, accès à 10 m, nuance argon, soudage BW à pleine pénétration sur bords droits ;
- ▶ **soudage TIG orbital de tube d'instrumentation du cœur des réacteurs REP (remplacement des raccords sertis par des raccords soudés en BW - 1995,CXN)** : soudage automatique avec tête fermée, $\varnothing$ 6,35 mm $\times$ ép. 0,89 mm et 9,52 mm $\times$ ép. 1,35 mm, nuance 316L, position PK, PC, gaz argon, soudage BW sur bords droits, plus de 10 000 soudures effectuées ;
- ▶ **soudage de couvercle sur capsule d'irradiation par procédé micro-TIG autogène en boîte à gant (2000,CXN)** : $\varnothing$ 4 mm, longueur 10 mm env., lèvres de 0,2 mm, nuance inox 316L, soudage automatique tête ouverte, position PA, tête orbitale, gaz argon, soudage sur lèvres minces, soudage en CC lisse, plus de 100 soudures (voir fig. 1) ;
- ▶ **soudage de bouchon sur conteneur de stockage de déchets nucléaires (2000, CXN)** : soudage TIG autogène en cellule blindée avec bras télémanipulateur : $\varnothing$ 500 mm, longueur 500 mm, lèvres de 2 mm, nuance 304L, soudage automatique tête ouverte, TIG pulsé, position PA tube tournant, gaz argon, plus de 100 conteneurs soudés (voir fig. 2) ;

CHAPITRE 2

Soudage orbital de tuyauterie

Dans la famille des procédés de soudage mécanisés, le soudage orbital intervient généralement lorsque la mise en rotation des pièces à assembler n'est pas possible pour des questions de dimensions, formes ou masse des composants.

On retient, en premier lieu, les procédés de soudage mécanisé avec mise en rotation des pièces dans la mesure où ils facilitent la soudabilité opératoire, en termes de recherche des paramètres de soudage et de mise en œuvre (la scène de soudage est toujours située à la même position) : une position de soudage unique est retenue, généralement choisie à plat pour des raisons de facilité de mise en œuvre du soudage (visibilité de la scène de soudage et maintien/bridage des pièces). La position corniche PC peut aussi être rencontrée pour faciliter le maintien du bain de fusion, dans le cas de soudage à plus forte énergie ou avec un volume de bain plus élevé (réduction des effets de la gravité).

Le soudage orbital fait appel principalement au procédé TIG (en courant continu, pulsé ou alternatif selon les matériaux à souder), avec métal d'apport (procédé 141) ou sans métal d'apport (procédé 142) selon les épaisseurs en jeu. Les premières applications du soudage TIG orbital remontent aux années 1980 dans le nucléaire, avec le soudage du circuit primaire principal des centrales REP (Spie Batignolles).

Mais on trouve aussi des applications avec des procédés de la famille 13X pour la pose de gazoducs et oléoducs à grande cadence (Serimer – Serimax).

À noter quelques tentatives de soudage par procédé à haute densité d'énergie (laser CO₂) en position PC corniche pour la pose d'oléoducs en J, développées pour TOTAL dans les années 1990-1995.

Dans la suite du document, nous détaillons le soudage **TIG orbital** et ses différentes déclinaisons :

- soudage TIG autogène (sans apport de métal), TIG avec métal d'apport sous forme d'insert fusible, TIG FF (fil froid) et TIG FC (fil chaud) ;
- trois sens de progression du soudage possible : orbital (360°), double montante, double descendante ;
- TIG CC lisse, TIG CC pulsé, TIG CA et ses variantes.



CHAPITRE 3

Soudage auto-adaptatif – apport de l'IA

3.1 Soudage auto-adaptatif (SAA)

3.1.1 Principes

Le principe du soudage auto-adaptatif (SAA) consiste à corriger en temps réel les paramètres de soudage pertinents en fonction d'aléas survenant pendant l'opération de soudage et sans intervention humaine de l'opérateur soudeur (principe de fonctionnement en boucle fermée).

Typiquement, en soudage orbital de tuyauterie, on peut identifier les aléas suivants :

- Aléas opératoires :
 - variation du jeu d'accostage entre les bords à souder,
 - variation du dénivelé entre les bords à souder,
 - écart de la position axiale de l'électrode dans le chanfrein par rapport à la position visée (par rapport au plan de joint ou le bord de chanfrein),
 - pompage thermique au passage des systèmes de bridage (clamp, clames, pontets, sauterelles...),
 - variation de mouillage ;
- Aléas métallurgiques :
 - variation de comportement du bain de fusion entre différentes coulées de matériaux de base ou d'apport (mouillage, pénétration).

Conclusion

Au terme de cette relecture de quarante ans de vie professionnelle au service du soudage, la motivation et les souvenirs sont toujours très présents. Cela m'a donné l'opportunité de me requestionner sur la pertinence de certains choix techniques. Peut-être, certains lecteurs y trouveront une source d'inspiration pour leurs développements en cours ou à venir : les choix à éviter ou les idées à retenir.

Mon souhait le plus profond : utilisez les outils émergents apportés via l'IA, mais gardez la passion de l'expérimentation pour faire progresser le soudage vers plus d'automatisation, en conservant la fibre du soudeur, homme de l'art et proche de la matière.

Pour finir, je dédie ce livre à Saint-Jacques-de-Compostelle, patron des pèlerins et inventeur du pas de pèlerin²¹, cher aux soudeurs : trois pas en avant, et deux pas en arrière.



© CPSLE

²¹ Information non confirmée

TECHNIQUES INDUSTRIELLES

Cette collection s'adresse aux élèves ingénieurs, aux étudiants de licence et de master ainsi qu'aux ingénieurs et techniciens supérieurs en activité désirant actualiser ou compléter leur formation dans les sciences de l'ingénieur.

Après quarante années consacrées à la conception et au développement de solutions de soudage complexes, Stéphane Leclerc partage son expérience du soudage en espaces confinés à forts enjeux stratégiques, notamment dans les domaines nucléaire et aquatique.

À partir de l'analyse de trente cas industriels concrets, l'auteur met en lumière les bonnes pratiques et les méthodes d'optimisation éprouvées au sein des grands acteurs du nucléaire, fabricants comme donneurs d'ordres. Un focus est consacré au soudage auto-adaptatif, avant de dresser un bilan de l'apport des systèmes experts et de l'intelligence artificielle appliquée au soudage sur une période de quarante ans, et d'envisager les évolutions à venir.

Ce guide propose un support pragmatique aux ingénieurs (IWE), techniciens (IWT/IWS), responsables de fabrication ou de maintenance, ainsi qu'aux chercheurs impliqués dans la conception de solutions soudées innovantes. Il s'adresse tout particulièrement aux acteurs des secteurs industriels à fortes contraintes (nucléaire, offshore) et aux opérateurs en soudage orbital.

Stéphane LECLERC

est expert en soudage, ingénieur soudeur ESSA (EWE)
et ingénieur CESI.

Editions TECHNIP

www.editionstechnip.com

35 €

ISBN 978-2-7108-1205-0



9 782710 812050