

PREMIÈRE APPLICATION INDUSTRIELLE DU SOUDAGE MAG AUTOADAPTATIF EN COURT-CIRCUIT CONTRÔLÉ

SOUDAGE AVEC SUIVI DE JOINT AUTOADAPTATIF DES FRETTES D'AIMANTS DIPOLAIRES LHC

T. TRAN TIEN (INSTITUT DE SOUDURE)

*Cela semblait être
«Mission impossible».*

*Devant les difficultés
opératoires que
présente une opération
de soudage manuel, le
soudage auto-adaptatif
a permis de surmonter
tous les obstacles.*

1 / INTRODUCTION

Le plus grand accélérateur collisionneur de particules au monde, le LHC (Large Hadron Collider), appelé le grand collisionneur de hadrons, sera construit dans le tunnel circulaire de 27km de circonférence, qui abrite aujourd'hui le grand collisionneur d'électrons et de positrons, le LEP, au laboratoire européen pour la physique de particules (CERN) situé à la frontière Franco-Suisse. Avec une

énergie 100 fois supérieures au LEP, soit 14 téraélectronvolts (TeV) ou 14 000 milliards d'électronvolts lors des collisions frontales de ces particules prévues en 2005, les physiciens espèrent que le LHC révélera l'apparition des particules de Higgs ou la découverte des - techniparticules -. L'Institut de Soudure (IS) a participé à ce projet extraordinaire pour mettre au point une technique de soudage auto-adaptatif avec suivi de joint au laser pour la réalisation de l'assemblage des frettes d'aimants dipolaires LHC.



Situation géographique de l'anneau LHC.



Image de synthèse de l'aimant enfoui dans le tunnel circulaire.

2/CONDITIONS DE BASE

2/1 MATERIAUX D'ASSEMBLAGE

Les frettes d'aimants à assembler, nommées cylindre de serrage après le soudage, sont constituées par deux demi-cylindres de 15 m de long en 316LN, d'épaisseur 10 mm. Les frettes sont positionnées autour de l'aimant et des instrumentations par une énorme presse, et sont ensuite assemblées par deux soudures longitudinales. La quantité totale nécessaire pour l'achèvement de l'anneau circulaire LHC, correspond à la fabrication de ces aimants en 1 235 exemplaires. Les caractéristiques géométriques du joint d'assemblage et les contraintes d'accostage des bords sont définies suivant le cahier des charges du CERN, voir ci-dessous.

La première difficulté technique lors de la mise en place des deux frettes d'aimants dans la presse, consiste à les placer de façon « symétrique » afin de mieux répartir les défauts d'accostage des deux joints, sur toute la longueur d'assemblage, sans que localement la valeur de jeu (gap) soit à l'extérieur de son domaine d'acceptation. D'autre part, dans des conditions extrêmes de préparation du joint, et en particulier sans latte support, une soudure avec un jeu minimal présente peu de risques d'effondrement du bain mais est plus sensible à un manque de pénétration. Le contraire survient, en revanche, en cas de jeu maximal. Il faut donc veiller à ce que les deux joints possèdent symétriquement des tolérances d'accostage qui ne soient pas de nature à créer des conditions de soudage plus délicates d'un côté que de l'autre.

2/2 PRODUIT D'APPORT

Les caractéristiques du produit d'apport utilisé pour cette application sont les suivantes:

- Nuance : SG-X2 CrNiMnMoN 20-16
- Diamètre : 1,2 mm
- Gaz de protection : Argon + 2 % CO₂ (protection endroit) et Argon pur (protection envers)
- Débit : 24 l/mn 24 l/m

2/3 CRITÈRES D'ACCEPTATION

Le document support, définissant les critères d'acceptation, est la norme EN 25817B.

3/CHOIX DES TECHNIQUES DE SOUDAGE

• 1) Avec latte support :

- TIG ou TIG pulse (faible taux de dépôt),
- MAG pulse.

Avantages et inconvénients : pas d'effondrement de bain, pointage manuel de la latte support (excès de métal) et accostage non maîtrisé (pas d'accès à l'envers des frettes) avec risque d'amorce de rupture lié à l'effet d'entaille.

• 2) Sans latte support :

- MAG CCC en passe de pénétration,
- MAG pulse en passes de remplissage.

Avantages et inconvénients : continuité métallique (meilleures caractéristiques mécaniques), taux de dépôt plus élevé. Par contre, équipement de protection gazeuse à l'envers du joint et risque d'effondrement du bain si les réglages effectifs sont mauvais.

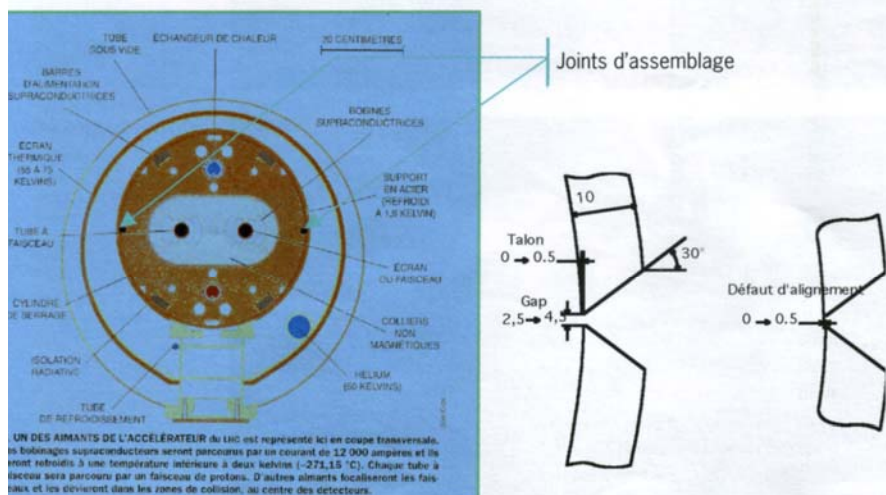
Le tableau ci-dessus met en relief synthétiquement les différentes solutions techniques avec les avantages et les inconvénients correspondant à la stratégie adoptée. Sans entrer dans les détails, la première solution avait été choisie dans un premier temps par le CERN, mais avec l'arrivée en phase de maturité des générateurs MAG en régime court-circuit contrôlé, technologie développée par LINCOLN et désignée sous le nom de MAG STT (Surface Tension Transfert), la deuxième solution a été retenue. Car il est possible de réaliser la passe de pénétration avec des plages de tolérances de jeu plus importantes que celles autorisées par les technologies connues jusqu'alors. Cette technique est destinée avant tout au mode semi-automatique après une formation pratique des soudeurs.

Cependant, les premiers aimants réalisés avec cette technique en soudage automatique ont révélé que l'effort physique demandé aux opérateurs devenait trop important. La durée du temps de soudage (> 3 heures) en phase de pénétration associée aux ajustements permanents des paramètres physiques de torche et des paramètres électriques de soudage pour d'une part, corriger la position d'impact de l'arc suivant la courbure du joint, et absorber la valeur effective du jeu d'autre part, peuvent les conduire à une défaillance de jugement. Ces dérives affectent la qualité du cordon, allant parfois jusqu'à l'effondrement du bain en cas de jeu (gap) important. Dans ce cas, on dispose de très peu de marge de manoeuvre et cela nécessite une très grande vitesse de convergence vers ce point de fonctionnement, les opérateurs confirmés peuvent instinctivement anticiper en jouant sur tous les réglages mais restent malgré tout débordés en cas de jeu extrême. La réparation reste toujours difficile car très peu de place disponible et aucun accès intérieur des frettes n'est possible en raison des équipements internes de l'aimant.

Face à ce constat, une autre solution reste à envisager qui consiste à utiliser la technique du soudage en mode suivi de joint autoadaptatif ; la caméra de vision au laser étant chargée d'assurer les corrections de la trajectoire avec (l'adaptation des paramètres de soudage selon la géométrie mesurée du profil effectif du joint. Pour cela, il faut définir au préalable les domaines de validation des paramètres étudiés et les résultats d'expérience obtenus à partir de ces essais, serviront par la suite sous forme de base de données ou de lois mathématiques qui seront intégrées dans un logiciel dédié à cette application.

4/INTERVENANTS

Le développement d'une telle application a nécessité une collaboration efficace entre



Caractéristiques physiques du joint.

l'ensemble des sociétés intervenantes. Sous la directive du CERN, donneur d'ordre du pro-jet, la société italienne CTE-Sistemi a été chargée de mettre au point la conception et la mise en fabrication de la presse, pour cha-cune des trois entreprises européennes retenues comme sites de production des aimants qui sont :

- ALSTOM-MSA (Belfort - France),
- ANSALDO Superconduttori SPA (Genes - Italie),
- BABCOCK NOELL NUCLEAR (Zeitz - Allemagne).

Les équipements de chaque presse disposent de générateurs de soudage (LINCOLN), du système de vision (SERVO-ROBOT) et des systèmes de commande de la presse (ORSI-Siemens). L'Institut de Soudure (IS) est chargé du développement de la stratégie de soudage des aimants et du suivi des essais de soudure préliminaires jusqu'en phase de début d'industrialisation.

5/MISE EN ŒUVRE DU SOUDAGE AUTO-ADAPTATIF

Le principe du soudage auto-adaptatif repose sur trois éléments fondamentaux qui constituent une chaîne fonctionnelle :

- un **capteur** capable de mesurer en temps réel, la position et la géométrie du joint à souder,
- un **modèle de variation** des paramètres de soudage en fonction de la géométrie effective déterminée par le capteur,
- une **commande du robot ou un chariot motorisé** de soudage

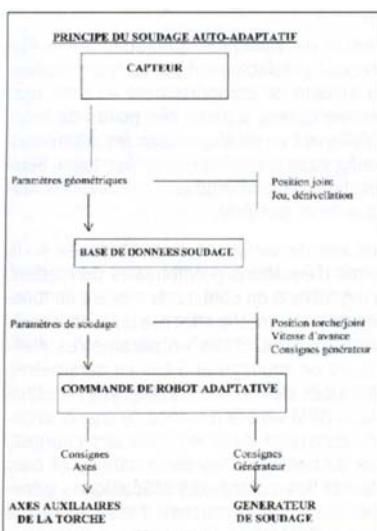


Schéma synoptique du soudage auto-adaptatif.

capable de moduler, en temps réel, la trajectoire de la torche et les réglages de soudage, suivant les données précédentes.

Les modèles polyvalents nécessitent une base de données importante mais restent soumis à de nombreux facteurs susceptibles de mettre en cause les lois ayant été déterminées. (changement de générateur, de torche, géométrie...) Ainsi, dans le contexte présent, des lois de variations simplifiées ont été développées, prenant en compte exclusivement les limites définies dans le cahier des charges et normalement assurées par les outillages et ne faisant varier pour s'y adapter que quelques paramètres, la vitesse d'avance par exemple restant fixe puisque les deux soudures longitudinales doivent être réalisées en même temps et symétriquement.

5/1 CAPTEUR DE VISION LASER

Son fonctionnement repose sur le principe de la triangulation. Une diode Laser émettant dans l'infrarouge envoie un faisceau lumineux sur la pièce. La trace du faisceau est observée, à travers un objectif, par une barrette CCD matricielle. Lorsque la distance entre le capteur et la pièce varie, l'image du point Laser se décale sur la barrette CCD. Pour ne pas être ébloui par la lumière de l'arc, un filtre passe-bande étroit est disposé

devant l'objectif. Ce dispositif conduit à une mesure ponctuelle de la hauteur de la pièce.

Pour avoir le profil complet du joint, le faisceau Laser est animé d'un mouvement de balayage perpendiculaire à la direction du laser. Celui-ci est obtenu par l'oscillation d'un miroir interne, qui assure simultanément la déviation du faisceau Laser et celle du plan d'observation de la barrette CCD. La fréquence de balayage, fixée par l'utilisateur est limitée à 30 Hz, ce qui autorise 60 acquisitions par seconde, si l'on effectue une mesure à l'aller et au retour. L'amplitude du balayage peut également être réglée par l'utilisateur, pour avoir le meilleur compromis entre la largeur du champ observé et la résolution.

Le suivi de joint est assuré par une caméra laser Servo-Robot de type BIP60. Le dépouillement du profil de l'image par la méthode de segmentation est traité dans le logiciel VISUS. Le logiciel ADAP calcule les paramètres de soudage optimaux d'après une base de données ou les équations mathématiques des lois de comportement préalablement définies. Le contrôleur du système envoie ensuite les valeurs ainsi calculées au générateur et aux commandes du chariot de la tête de soudage pour application immédiate. La mémorisation de la trajectoire du joint est effectuée automatiquement dans le module TRAJECTORY jusqu'à la fin de l'opération de soudage.

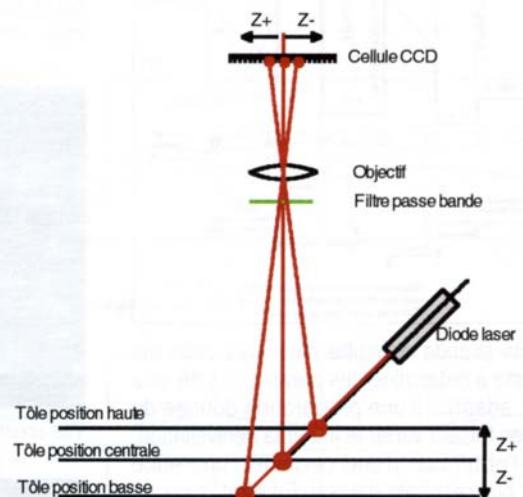


Caméra de vision BIP 60 (Servo-Robot)

Caractéristiques techniques :

- Fréquence d'acquisition d'image : 60 profils/s
- Résolution d'image : 0,03 mm
- Profondeur de champ (D) : 60 mm
- Largeur inférieure de champ (C) : 60 mm
- Largeur supérieure de champ (B) : 48 mm
- Distance champ/caméra (A) : 114 mm

Exemple : Avec une vitesse de soudage de 60 cm/min, cela correspond à une fréquence d'acquisition de 6 profils/mm.

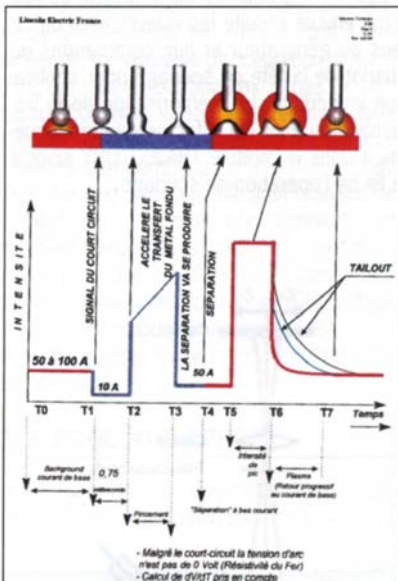


5/2 CONSTRUCTION DU MODÈLE DE SOUDAGE ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE D'APPROCHE

Les lois de soudage sont déterminées au moyen d'une source de courant de marque LINCOLN STT455 Power Wave. En collaboration avec le CERN, les essais ont été réalisés dans l'atelier « Magnet Assembly Facility » sur le site de Meyrin.

Cette technique permet de gérer en continu les paramètres de l'arc pour n'amener l'énergie que lorsque c'est nécessaire et en quantité limitée. On peut ainsi optimiser l'énergie de soudage suivant les configurations du joint en jouant sur trois réglages :

- Courant de base (I_b) : quantité de chaleur apportée à la pièce.
 - Courant de pic (I_p) : quantité de chaleur apportée au fil, c.a.d. la hauteur de l'arc et son pouvoir pénétrant.
 - Vitesse de fil (V_f) : taux de dépôt.
- En revanche, le cycle de détachement est entièrement géré par le générateur.



La plus grande difficulté n'est pas celle qui consiste à déterminer les paramètres de soudage, adaptés à une préparation donnée du joint, en faisant varier le jeu et la dénivellation, mais l'obtention d'une certaine cohérence quant aux résultats d'essai. En effet, sans un minimum d'analyse et de méthode, nous risquons d'aboutir à une collection hétérogène de réglages qui sera difficilement exploitable pour une modulation en continu.

La méthode utilisée consiste à effectuer des essais préliminaires avec un double objectif :

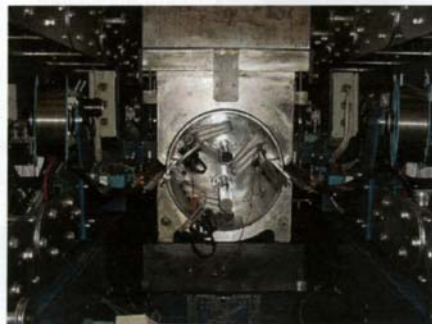
- limiter le nombre de paramètres variables du modèle, en recherchant ceux dont la variation produit les plus grands effets. Ce critère permet de simplifier la modélisation, et garantit une meilleure cohérence entre réglage;

- pour les paramètres conservés constants, réaliser des essais en couvrant, de façon la plus large possible, la gamme des géométries des préparations.

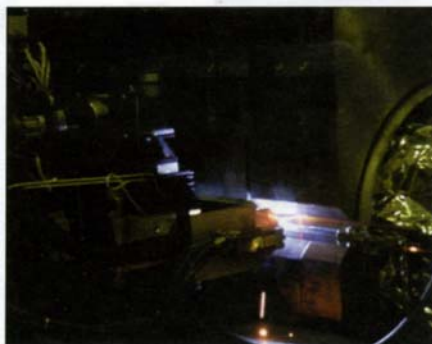
L'ordre des essais repose sur le constat suivant : les jeux et les dénivellations intermédiaires correspondent généralement aux règles de l'art, c'est à dire à un réglage facile à obtenir, avec des plages de tolérances assez étendues sur les paramètres de soudage. Au contraire, les jeux et dénivellations extrêmes sont associées à des réglages pointus, qui ne marchent qu'avec des valeurs précises des paramètres de soudage. Il convient donc de fixer un nombre aussi grand que possible de valeurs permettant de traiter les géométries extrêmes.

5/3 EQUIPEMENT DU CHARIOT MOTORISE

Sont intégrés sur le chariot motorisé, un dévidoir de métal d'apport et une caméra de vision BIP60 de Servo-Robot placée devant la torche de soudage. Sa trajectoire et ses mouvements de balayage agissent dans le plan cartésien (Y, Z) du chariot pendant son déplacement selon les corrections envoyées par une liaison en série RS232 du contrôleur du système de vision. En plus du mouvement physique de la torche, les caractéristiques géométriques du joint mesurées par la caméra, sont en même temps traitées dans le logiciel ADAP du contrôleur qui envoie les corrections de paramètres de soudage, à partir des lois de comportement préalablement définies, au générateur pour applica-



Vue arrière des chariots.



Vue avant d'un chariot.



Presses de soudage des frettes : force totale environ 18 000 tonnes utilisée pour la soudure longitudinale des frettes cintrées.

tion immédiate. Un deuxième équipement à l'identique est également pourvu du deuxième côté de la presse ; chacun gère de façon autonome. La pénétration de la sou-dure est protégée par un système amovible de renvoi mobile de protection gazeuse attaché au chariot.

Il est à noter que pour assurer la simultanéité des amorçages de l'arc de chaque côté du joint ainsi que leur extinction en fin de cordon, (activation de ces fonctions et le déplacement des deux chariots (axe X) sont contrôlés grâce à un système de commande à distance ORSI-Siemens, qui joue également le rôle de maître pour la surveillance du système de contrainte et de pression des vérins hydrauliques de la presse.

6/ VALIDATION DU SOUDAGE AUTO-ADAPTATIF

L'essai de validation auto-adaptatif a été précédé préalablement par la détermination du modèle de comportement en soudage, modèle obtenu à partir des points de fonctionnement en soudage selon les différentes configurations géométriques (jeu, talon, dénivellation) du joint étudiées en condition statique (hors caméra).

Les lois de variations ainsi obtenues sous forme d'équations polynomiales permettent la modulation en continu du modèle en fonction de la géométrie effective du joint. Il comporte au total, 3 lois en paramètres électriques de soudage et 3 lois en paramètres physiques de torche. En revanche, (l'optimisation de la vitesse d'avance du chariot imposée constante dans le cahier des charges, afin de minimiser les déformations et bien répartir les contraintes mécaniques générées durant le processus d'assemblage, a permis l'obtention d'une vitesse maximale égale à 75 mm/min.

• Modèle de comportement en soudage

1^{re} passe : 6 lois de soudage = f(géométrie) en MAG CCC

Paramètres physiques :

- 1) Distance buse/pièce*
- 2) Amplitude de balayage
- 3) Fréquence de balayage

Paramètres électriques :

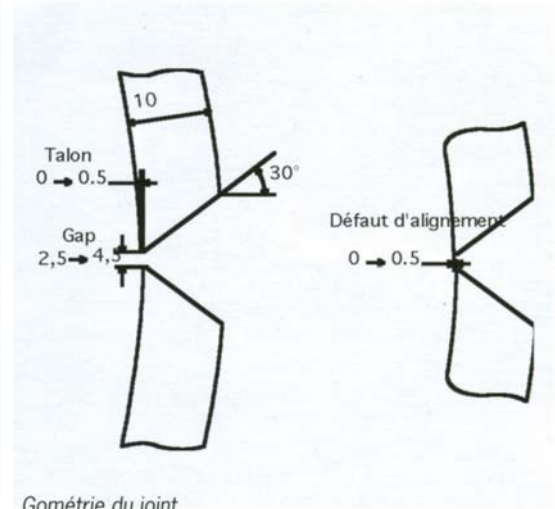
- 4) Intensité de pic
- 5) Intensité de base
- 6) Vitesse de fil

Vitesse de soudage constante à 75 mm/mn.

Passes de remplissage : paramètres constants en MAG pulsé synergique

- Vitesse de fil, Vitesse de soudage
- Intensité de pic
- Intensité de base

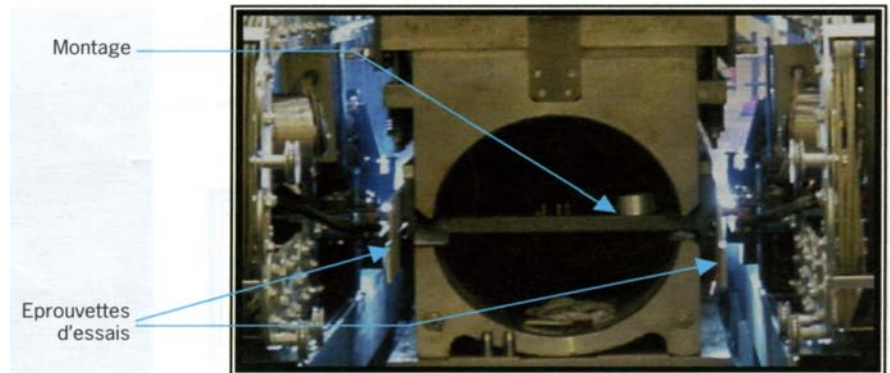
* On s'appuie sur la buse pour mieux définir la distance tube-contact/pièce.



Gométrie du joint.

6/1 PREPARATION DES EPROUVETTES D'ESSAIS

Les éprouvettes d'essais en position corniche, sont maintenues par écrous directement sur la table en H de la presse prévue à cet effet. Pour éviter les risques de retrait du joint en cours de soudage, les tôles sont bridées sur la table au moyen des cordons TIG répartis sur toute la longueur de l'éprouvette. Au préalable, les valeurs de jeu variables pour le besoin des essais, ont été mesurées au moyen des jauges d'épaisseur avant le test dynamique de validation du modèle.



Eprouvettes d'essais

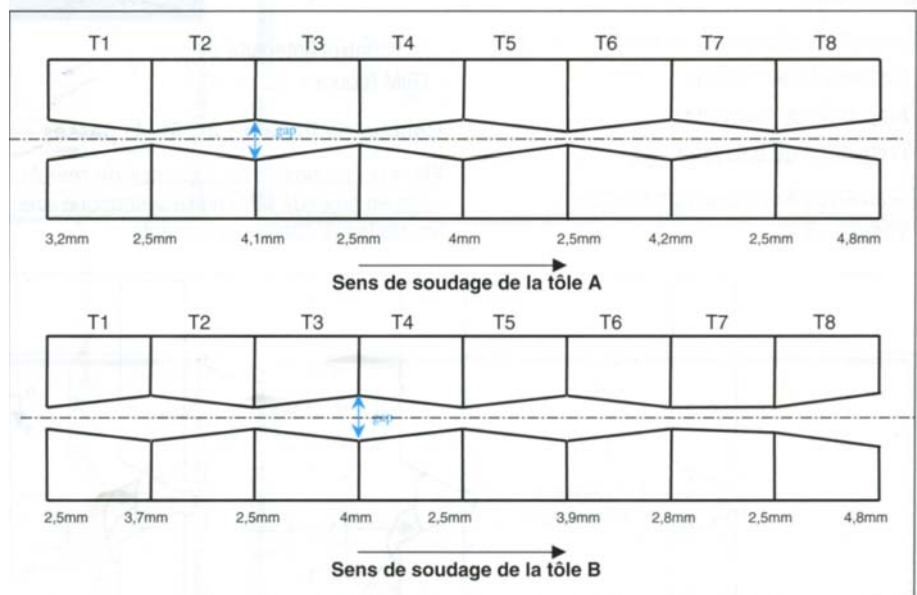
- Nature : 304 L

- Dimension (mm) : 1 800 x 120 x 10

- Etat de surface : usiné (les bords du chanfrein de 30°) et ponce avec du papier de verre pour éviter une surface trop brillante, néfaste pour la détection du profil par le laser.

Pour simuler les soudures des frettes d'aimants caractérisées par une longueur de 15 m chacune, se trouvant de part et d'autre de la presse (A et B), les tôles d'essais sont raboutés sur tout le long de la table de montage comme le montrent les schémas ci-contre :

Nota : Les tôles sont placées de façon à reconstituer une trajectoire en courbure ($A_y > 16$ mm), représentant les conditions réelles de soudage des frettes d'aimants.



6/2 STRATEGIE DE REMPLISSAGE

Comme on peut le constater, les plaques de joint A et B constituées chacune de 8 éprouvettes, représentant la longueur d'assemblage des frettes d'aimants, comportent des jeux variables en opposition. Ceci avait pour but de

mettre en évidence la gestion indépendante de l'autoadaptativité du modèle de soudage, les deux chariots se déplaçant à vitesse constante. Toutefois la dernière tôle T8 sur chaque côté A et B, possède en son extrémité la valeur de gap importante (gap = 4,8 mm) afin de pouvoir déterminer la valeur ultime de gap capable d'être absorbée dans les conditions extrêmes de service. Pour rappel, la vitesse d'avance de

la passe de pénétration est de 75 mm/mn, soit un temps théorique de soudage de 3 h 20 minutes pour 15 m de longueur d'assemblage. La synchronisation de l'opération de soudage automatisé des deux côtés, est précédée au



Suivi de joint au laser.



Visualisation du profil du joint.

préalable d'un passage à vide de leur chariot respectif tout le long du joint, la caméra laser étant chargée d'enregistrer la géométrie effective du joint (1 024 points de mesures). Cette technique de mémorisation de la trajectoire du joint permet, lors de l'exécution des passes de remplissage, de positionner leur emplacement effectif suivant les valeurs de décalage de la trajectoire attribuées à chacune d'entre-elles (voir le schéma ci-dessous).

Couche de pénétration : 1^{re} passe

Les lois de variations ont été déterminées pour les 6 paramètres de soudage qui sont les suivants :

Paramètres physiques de torche : - Distance buse / pièce.
- Amplitude de balayage.
- Fréquence de balayage.

Paramètres électriques de soudage :

- Vitesse de fil.

- Arc control (intensité de pic).
- TRIM (courant de base).

- Vitesse de soudage = 380 mm/mn.

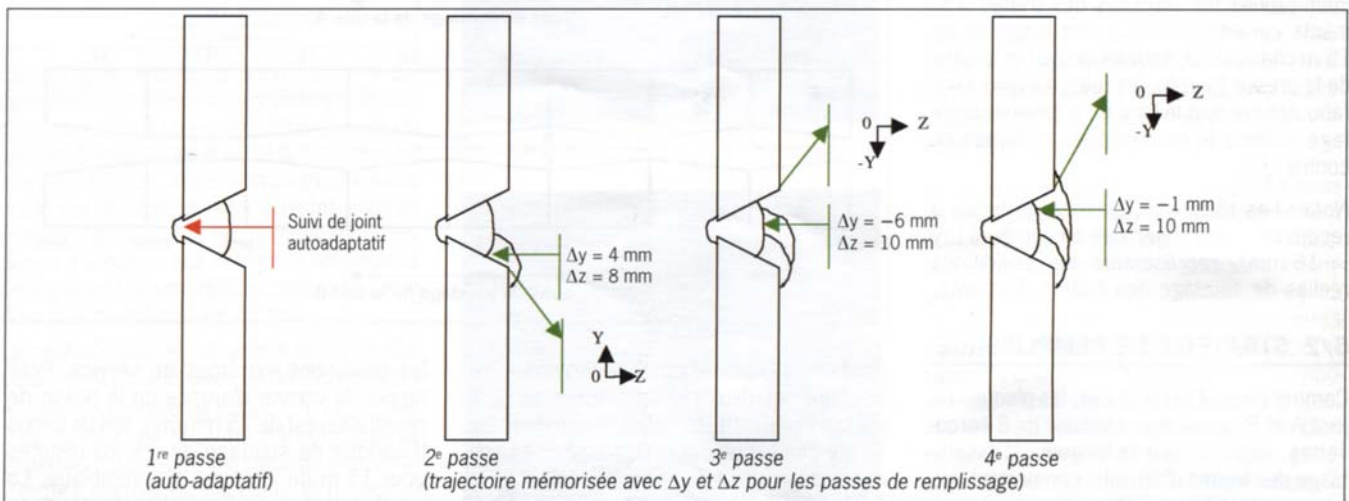
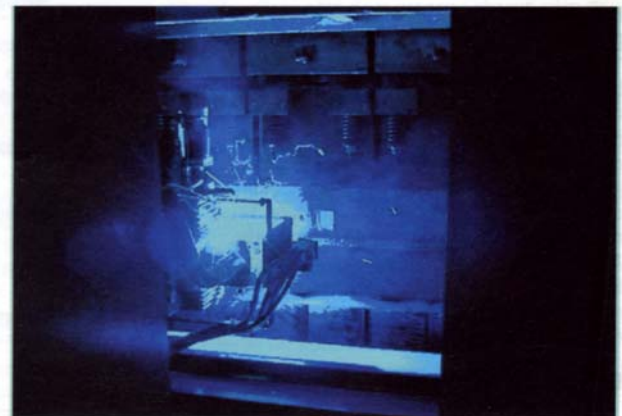
- Vitesse de fil = 8 mm/mn.

- Arc Trim = 900.

Couche de finition : 2^e, 3^e, 4^e passes

Elle est composée de 3 passes de remplissage en procédé MAG pulsé synergique avec les réglages constants suivants :

- Distance buse/pièce = 8 mm (2^e passe)
= 10 mm (3^e et 4^e passes).



Stratégie de remplissage.

PROCÉDÉS



Simulation de soudage des frettes d'aimants.

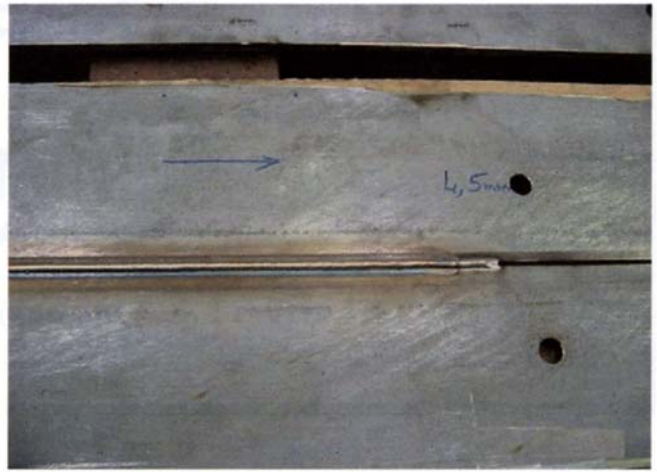
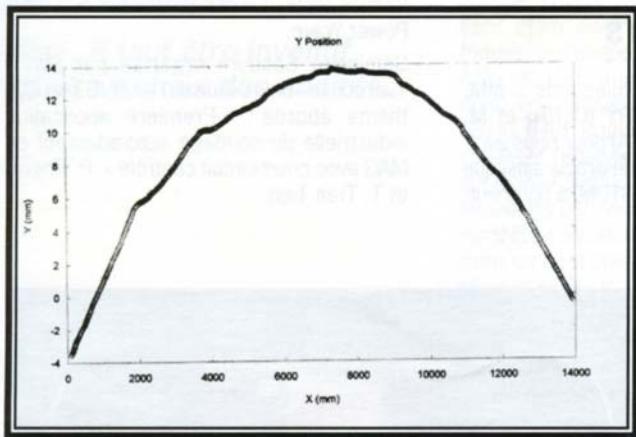
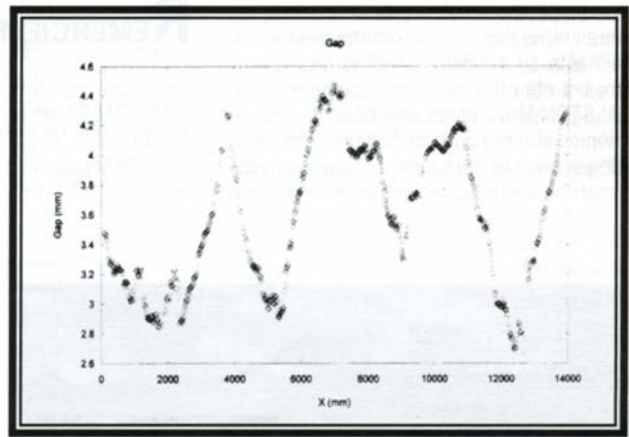


Illustration de la pénétration obtenue dans une zone à jeu maxi.

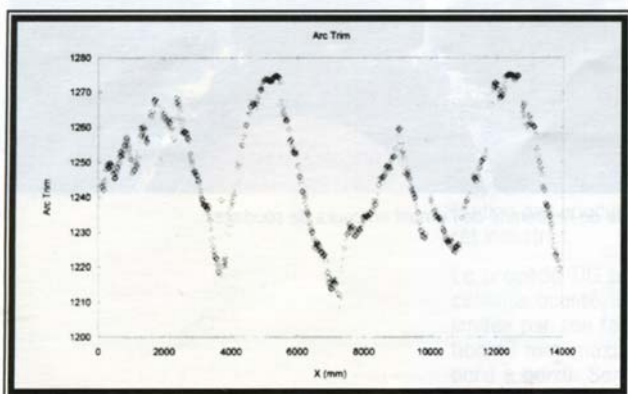
Exemples d'illustrations graphiques du soudage auto-adaptatif du côté A



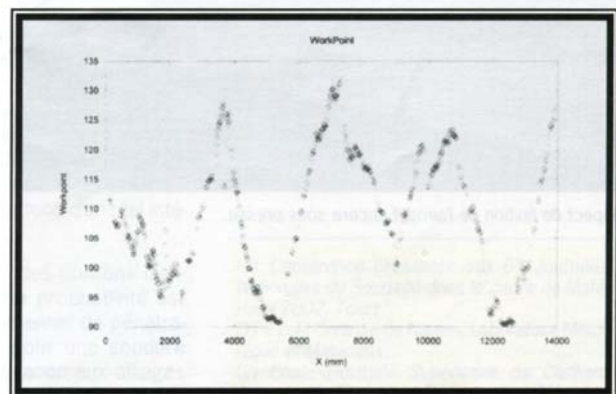
Trajectoire du joint.



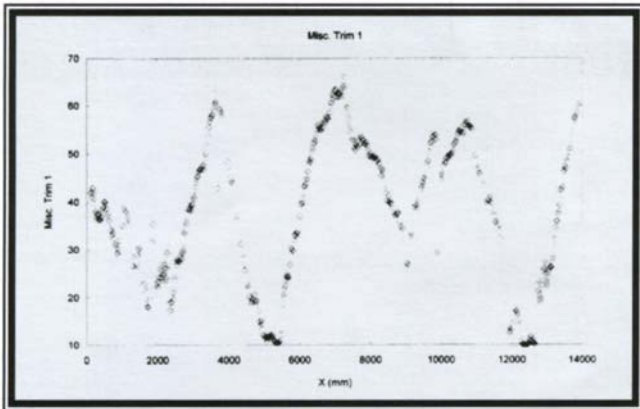
Jeu.



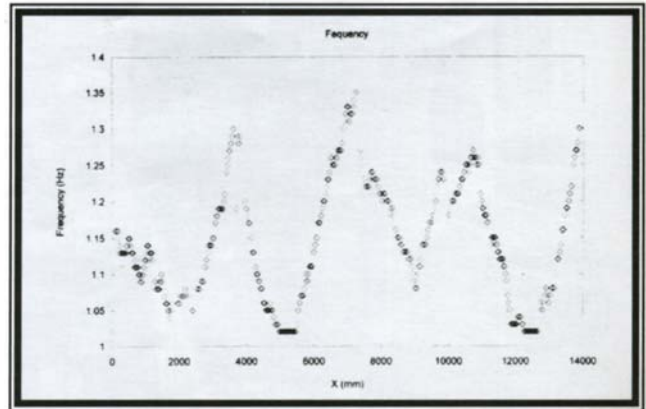
Ipic (repère).



Vitesse de fil (repère).



ibas (repère).



Fréquence de balayage (Hz).

7/SOUDURES SUR AIMANTS ET TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

A partir de ces résultats probants, les premières réalisations des soudures des frettes d'aimants en conditions réelles de fabrication, ont été effectuées en décembre 2001 à ALSTOM-MSA, après une période d'adaptation consacrée au transfert de cette technologie pour le personnel concerné. Cette démarche a été également poursuivie pour

les deux autres sites de production, ANSALDO (Italie) et BABCOCK NOELL NUCLEAR (Allemagne), respectivement en mars et juin 2002.

REMERCIEMENTS

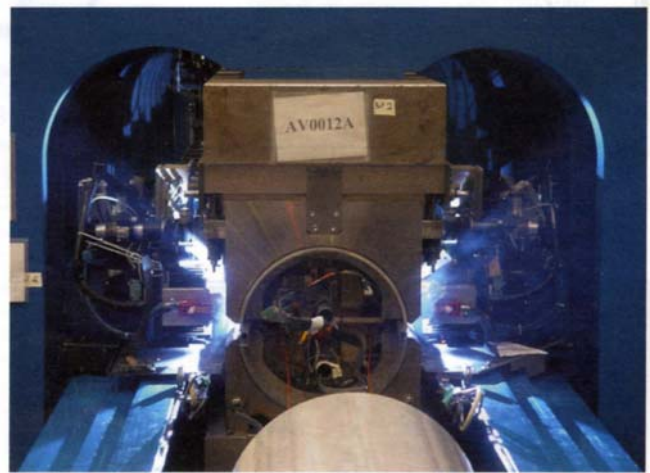
J'adresse mes vifs remerciements à MM. J. VLOGAERT et F. SAVARY (CERN) et M. D. BRESSON (ALSTOM-MSA) pour nous avoir autorisé la publication de cet article ainsi que les photos d'illustration (ALSTOM) à l'intérieur.

BIBLIOGRAPHIE

- Rapport technique IS/S/N° 37574-1 (CERN).
- Rapport technique IS/S/N° 37925 (ALSTOMMSA).
- Recueil technique du générateur STT 455 Power Wave.
- Séminaire Soudure organisé par SWI à Yverdon-les-Bains (Suisse) le 21/03/2002, thème abordé : « Première application industrielle du soudage auto-adaptatif en MAG avec court-circuit contrôlé ». P. Roguin et T. Tran Tien.



Aspect de finition de l'aimant encore sous presse.



Vue de l'extrémité de l'aimant en cours de soudage.