



EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH  
ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

## CERN - TS Department

EDMS Nr: 473748

Group reference: TS-MME

TS-Note-2004-035

5 May 2004

### TECHNIQUES DE FORMAGE ET D'ASSEMBLAGE

G. Favre, S. Mathot

#### Abstract

Les sections Techniques d'Assemblage du groupe EST/MF et Brasage du groupe EST/SM ont été groupées en un seul service dans un but de rationalisation accrue des ressources et méthodes. Ce service dispose de nombreux moyens : soudure et découpe LASER (YAG, 350 W), soudure par faisceau d'électrons (deux installations, 35 et 7.5 kW), équipements TIG orbital, jet line, MIG, soudure plasma, boîte à gants, portique de soudage trois axes multiprocédés, presses plieuses, rouleuses, moyens de repoussage, alimentation à induction 12 kW et divers fours sous vide et à air. Le service est composé de 17 personnes dont la polyvalence est encouragée. Les activités de la section seront décrites à travers quelques exemples significatifs récents, notamment : l'assemblage des amenées de courant HTS, la réalisation des chambres LSS, des tubes HET, d'enveloppes céramiques pour détecteurs PET-HPD, le brasage de RFQ, la soudure du Barrel d'ATLAS ou encore le soudage des lignes de thermalisation du toroïde d'ATLAS.

**Presented at the TS Workshop  
Archamps, France, May 4 – May 6, 2004**

## 1 INTRODUCTION

La section Assemblage est née avec le groupe MME et de la jonction des sections en charge de la tôlerie et soudure du groupe EST/MF et de traitement thermique et brasage du groupe EST/SM.

Ce regroupement a pour but une meilleure garantie du choix des méthodes à utiliser pour la réalisation des travaux demandés au groupe. En effet, chaque demande fait l'objet d'une discussion technique au sein de la section. Avec le requérant ou le projeteur, le projet est étudié d'abord dans son ensemble et le choix de la ou des méthodes d'assemblage à préconiser est esquissé. Ensuite, ce choix est affiné avec les différents spécialistes et tous les détails du projet comme l'outillage ou le délai sont pris en compte.

L'avantage de cette méthode de travail est de proposer à un responsable de projet un seul interlocuteur, généralement le chef de section, qui aura une vue globale des problèmes d'assemblage posés et qui pourra organiser au sein de la section les discussions techniques nécessaires avec une équipe réellement pluridisciplinaire.

La suite de ce papier dresse une liste complète des moyens techniques de la section et donne ensuite quelques exemples de réalisations.

## 2 MOYENS TECHNIQUES

### 2.1 Tôlerie/chaudronnerie/tuyauterie

La section dispose de moyens permettant d'effectuer des travaux de tôlerie fine, tôlerie, chaudronnerie et tuyauterie couvrant une gamme d'épaisseurs allant du centième de millimètre à plusieurs centimètres. Les équipements de formage sont adaptés à cette diversité. Leurs caractéristiques principales sont rappelées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Equipements de formage

Procédés	Caractéristiques
Presse plieuse CN	Puissance 200 t en largeur 3000 mm, 100 t en largeur 1000 mm Précision : 0.1 mm sur la rectitude et la longueur de pli
Plieuse à tablier CN	Largeur utile 2040 mm, pliage de tôles de 0.2 mm à 5 mm Précision $\pm 0.5^\circ$ sur l'angle de pliage, $\pm 0.1$ mm sur la hauteur de pliage
Rouleuses	2, 3 ou 4 rouleaux selon technologie Capacité de rouage de quelques dixièmes de mm à plusieurs centimètres
Extrusion	Extrusion sur tôles planes ou sur tubes sans limitation de dimension Diamètres d'extrusion : de quelques millimètres à 400 mm Epaisseur max. pour les aciers inoxydables : 8 mm
Tours à repousser	Diamètres max. de repoussage : 1000 mm Epaisseurs : alliage cuivre : 0.2 mm à 4 mm, alliages aluminium : 0.2 mm à 5 mm, aciers inoxydables : 0.5 mm à 3 mm
Cintreuses	Cintrages standards et maîtrise du cintrage des faibles épaisseurs (0.1 mm)
Hydroformage	Outillage défini en fonction des applications

L'atelier dispose d'autre part d'équipements de débitage permettant de couvrir les fortes épaisseurs (scies à ruban, scies circulaire, guillotines, coupage plasma) et les faibles épaisseurs nécessitant une qualité de coupe et de précisions accrues (découpage laser, guillotines de précision).

### 2.2 Soudage

La section AS possède de nombreux procédés de soudage manuel et automatiques : TIG, TIG fil froid, TIG fil chaud, micro plasma, plasma, électrode enrobée, MIG/MAG, soudage par résistance, faisceau laser, faisceau d'électrons. Leur complémentarité permet de couvrir une gamme étendue d'applications tant au niveau des matériaux employés, que des épaisseurs. Le choix du procédé s'effectue sur des critères tels que l'épaisseur à souder, la nuances des matériaux, la maîtrise des déformations, la limitation des zones affectées thermiquement, la compacité des soudures, l'état de surface, etc. Les caractéristiques des principaux équipements automatiques sont donnés dans le tableau 2.

**Tableau 2 : Equipements de soudage**

<b>Procédés</b>	<b>Caractéristiques</b>
Banc de soudage multiprocédé	3 axes linéaires 4000 x 2000 x 1500 mm + 1 axe rotation gérés par CN Procédés de soudage programmables : TIG, TIG fil froid, fil chaud, plasma Gamme de courant : 5 A à 600 A Equipements : AVC (Arc Voltage Control), enregistrement des paramètres de soudage
TIG orbital	5 sources, 8 têtes de soudage ouvertes ou fermées Diamètres couverts : de quelques mm à plusieurs dizaines de cm Spécificités : têtes à encombrement réduit, AVC, possibilité d'emploi métal d'apport, enregistrement des paramètres de soudage
Boîte à gants purgeable sous vide	Enceinte de soudage de 1.5 m <sup>3</sup> extensible par emploi de rallonges Cycle automatique de vide (10 <sup>-3</sup> torr) / remplissage par un gaz neutre Equipements : analyseur de vapeur d'eau, analyseur d'oxygène
Soudage par résistance	Epaisseurs soudables de ≈ 0.1 mm (micropointage) à 3 mm sur aciers inoxydables.
Soudage FE Equipement PTR	Chambre à vide : 9 m <sup>3</sup> extensible par emploi de rallonges Canon à électrons : 30 kW, tension d'accélération 70 kV, intensité 430 mA Epaisseurs soudables (mm) : acier inox : 60 / aluminium : 80 / cuivre : 40
Soudage FE Equipement Leybold	Chambre à vide : 1 m <sup>3</sup> extensible par emploi de rallonges Canon à électrons : 7.5 kW, tension d'accélération 150 kV, intensité 50 mA Epaisseurs soudables (mm) : acier inox : 15 / aluminium : 30 / cuivre : 10
Laser YAG	Puissance 350 W, puissance de crête : 4.5 kW Epaisseurs soudables (mm) : acier inox : 1.5 / aluminium : 0.5 / cuivre : 0.2

### 2.3 Brasages

Pour le brasage, la section dispose de 6 fours à vide. Les caractéristiques de ces fours sont reprises dans le tableau 3. La section dispose aussi d'un système de chauffage à induction de 12 kW.

**Tableau 3 : Fours à Vide**

<b>Type</b>	<b>Axe</b>	<b>Dim. utiles (mm) h x l x L</b>	<b>Temp. max. (°C)</b>	<b>Pression à 900 °C (mbar)</b>	<b>Mise en service</b>
CSF	V	φ300 x 500	800	< 1.10 <sup>-5</sup>	1965
VMDI V	V	φ550 x 1450	1200	< 1.10 <sup>-5</sup>	1968
VMDI H	H	φ550 x 1650	1200	< 1.10 <sup>-5</sup>	1969
DVM	V	φ400 x 500	1400	< 5.10 <sup>-6</sup>	1978
VAS	V	φ150 x 200	1600	< 5.10 <sup>-6</sup>	1984
PVA	V	φ650 x 1750	1350	< 5.10 <sup>-6</sup>	2002

### 2.4 Traitements thermiques

Pour le traitement thermique, à la fois les fours à air ou des fours à vide peuvent être utilisés. Les traitements typiques sont la stabilisation de pièces en cuivre ou en acier, le durcissement structural, les traitements magnétiques ou le grillage de céramiques.

Les caractéristiques des fours à air sont reprises dans le tableau 4.

**Tableau 4 : Fours à Air**

Type	Axe	Dim. utiles (mm) h x l x L	Temp. max. (°C)	Mise en service
Borel CH6	H	150 x 240 x 400	1150	1955
Borel Sole mobile	H	1500 x 1600 x 2650	1200	1965
Safed 1600	H	250 x 250 x 450	1600	1974
Safed Alu	V	∅980 x 1400	600	1976
Borel BK9	H	350 x 370 x 680	1200	1980

### 3 DESCRIPTIF DES PROCÉDÉS DE SOUDAGE ET BRASAGE

Une opération de soudage se caractérise par la mise en fusion des métaux de base qui participent à la formation du joint soudé. Le brasage utilise un métal d'apport dont la température de fusion est inférieure à celle des matériaux de base qui ne sont pas mis en fusion.

#### 3.1 Procédés de soudage

- Electrode Enrobée (EE) : Mise en fusion d'une électrode enrobée par un arc électrique. Protection du bain de fusion assurée par l'enrobage qui dépose un laitier en surface du cordon. Procédé adapté au soudage en zone d'accessibilité réduite.
- MIG (Metal Inert Gas) / MAG (Metal Active Gas) : Mise en fusion d'un fil se dévidant en continu. Protection du bain de fusion assurée par un gaz neutre tel que Ar, He (MIG) ou un gaz actif tel que CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (MAG) ayant une action chimique sur le métal fondu. Procédé à taux de déposition élevé, génère une Zone Affectée Thermiquement (ZAT) et des déformations limitées comparativement au TIG. Procédé bien adapté à l'automatisation.
- TIG (Tungsten Inert Gas) : Mise en fusion des métaux à assembler par un arc électrique jaillissant entre une électrode de tungstène réfractaire et le métal de base. Protection du bain de fusion par un gaz neutre ou actif. Procédé précis bien adapté au soudage des faibles épaisseurs. Utilisable avec ou sans métal d'apport. Compacité des cordons élevée.
- Plasma : Dérive du procédé TIG. Utilisation d'une torche particulière permettant la constriction de l'arc grâce à un gaz plasmagène. La puissance spécifique est fortement augmentée ce qui autorise le soudage en mode « key-hole ». Possibilité de souder des épaisseurs fortes (8 mm) sans chanfrein avec limitation des déformations. Compacité des cordons élevée.
- Résistance : Deux électrodes appliquent une pression sur les parties à assembler et provoquent leur fusion par effet Joule.
- Faisceau d'électrons (FE) : Accélération d'un faisceau d'électrons dans une enceinte à vide. L'impact du faisceau d'électrons provoque la fusion de la matière. Possibilité de soudage en mode « key-hole » (déplacement d'une zone de soudure ayant une grande profondeur de pénétration sur une surface limitée). Le soudage ayant lieu sous vide, la protection gazeuse n'est pas nécessaire. Procédé à haute densité d'énergie adapté aux faibles comme aux fortes épaisseurs. Procédé générant avec le soudage laser les ZAT et les déformations les plus faibles. Permet d'effectuer des soudures avec une précision très élevée, de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre.
- Laser : Soudage ou découpage de matériaux métalliques ou non métalliques par impact d'un faisceau LASER. La protection des matériaux en fusion est assurée par un gaz neutre. La capacité de soudage/découpage dépend du couplage faisceau/matière. Ce couplage est fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  du LASER utilisé ( $\lambda = 1.02 \mu\text{m}$  pour le YAG). Applications similaires au soudage FE. Possibilité d'utiliser le faisceau à distance ou en zones d'accessibilité limitée par l'emploi de fibres optiques.

Le domaine d'application de chaque procédé est indicatif, il peut être largement élargi en fonction des caractéristiques recherchées.

### **3.2 Procédés de brasage**

En plus du brasage à la flamme ou par induction avec apport de matière et utilisation d'un flux décapant, la section dispose de fours pour le brasage sous vide (pression entre  $10^{-5}$  et  $10^{-6}$  mbar). Dans ce cas, les matériaux d'apport sont des alliages de haute pureté, basse tension vapeur, et le brasage se fait sans flux. L'avantage est de produire des assemblages parfaitement propres, compatibles avec les applications sous ultra-vide.

Cette méthode s'applique aussi bien à l'assemblage de métaux similaires que di-similaires ainsi qu'aux jonctions céramique / métal. Les alliages de brasage utilisés au CERN ont des températures de fusion allant de 750 °C à 1100 °C. L'utilisation de différents alliages permet, sur un même assemblage, de procéder à des étapes de brasage successives.

Ces fours sont également utilisés pour le brasage tendre (ou « soldering »). On parle de brasage tendre lorsque les alliages de brasage utilisés ont une température de fusion inférieure à 450 °C.

## **4 EXEMPLES DE RÉALISATION**

### **4.1 Heat Exchanger Tubes (HET)**

Les HET des aimants du LHC sont composés d'un tube en cuivre OF de diamètre 54/58 mm de longueur comprise entre 5507 mm et 15328 mm et fonctionnent sous une pression externe de 20 bars. La connexion sur le circuit en acier inoxydable est réalisée par une transition brasée sous vide inox/cuivre rapportée ensuite par soudage sur le tube principal en cuivre. Le choix du mode de soudage s'est porté sur le faisceau d'électrons (FE), procédé à haute densité d'énergie, pour limiter au maximum la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) contrairement au procédé à basse densité d'énergie tel que le TIG générant une ZAT importante. Les essais ont montré que, par le procédé TIG, le flambage commence à une pression inférieure à 60 bar tandis que par FE le flambage ne concerne plus la soudure mais seulement le tube et cela à partir de 110 bars.

### **4.2 Chambres à vide LSS**

Les chambres à vide LSS du LHC sont réalisées à partir d'un tube de 7 m de longueur et de 80/84 mm de diamètre en cuivre OFS dont les propriétés mécaniques ne sont pas affectées lors de l'activation à 300 °C de la couche mince de getter (NEG). Les brides de connexion en acier inoxydable sont assemblées par brasage sous vide sur une manchette en cuivre OFE limitée à 50 mm de longueur pour éviter tout risque de flambage. L'ensemble bride manchette est ensuite soudé par TIG circulaire avec un refroidisseur pour limiter la ZAT côté cuivre OFS. Cette technique permet de réaliser au meilleur coût l'assemblage des LSS en remplissant deux caractéristiques essentielles : étanchéité et géométrie.

### **4.3 Soudures d'étanchéité sur cryostat barrel ATLAS**

Afin d'assurer l'étanchéité entre l'argon liquide et le vide d'isolation en cas de défaillance des joints de type  $\Omega$  (support de joint indium), des soudures d'étanchéité TIG et MIG ont été réalisées sur les couvercles en alliage d'aluminium 5083 du cryostat barrel d'ATLAS. Cette opération a nécessité un développement poussé d'une part pour maîtriser la température en cours de soudage afin de ne pas détruire les joints indium situés à proximité des joints soudés, d'autre part pour obtenir une bonne compacité des cordons de soudure sur plusieurs dizaines de mètres de soudure en soudage toutes positions avec une accessibilité limitée.

Les tests de fuite ont révélé une parfaite étanchéité de l'ensemble des soudures réalisées.

### **4.4 Lignes aluminium de thermalisation des toroïdes ATLAS**

Cette application a été internalisée suite à une défaillance de l'industrie. Les lignes sont constituées d'un profilé AL 1050 de section carrée 24 mm x 24 mm avec une ouverture circulaire de diamètre 15.7 mm. Elles ont une longueur de 27 m et reçoivent à leurs extrémités des transitions bimétalliques Al 5083/acier inoxydable 316 L. La difficulté de cette application est liée d'une part au niveau de qualité exigé pour les soudures niveau B « exigence élevée » selon ISO 10042, d'autre part à la nécessité de maîtriser la température en cours de soudage pour ne pas détériorer les transitions aluminium/inox. Deux procédures de soudage TIG circulaire ont été développées et qualifiées pour

réaliser les connexions Al 1050/Al 1050 pour constituer des longueurs de 27 m, puis Al 1050/Al 5083 pour le soudage des transitions. Un banc de soudage circulaire a été mis au point pour mettre en rotation les tubes aluminium sans les brider afin de permettre au retrait de soudage d'avoir lieu librement et supprimer ainsi l'apparition de microfissures.

A présent 512 soudures ont été réalisées pour fabriquer 128 lignes. Ces soudures ont passé avec succès l'examen radiographique à 100%, le test d'étanchéité au vide et à la pression, le contrôle dimensionnel.

#### **4.5 Amenées de courant HTS**

L'assemblage des prototypes des amenées de courant HTS (High Temperature Superconductor) est un bel exemple de réalisation multi-technologique. Ces amenées sont constituées de deux ensembles, la tête et la partie HTS, assemblés par brasage sous vide et soudés ensuite par faisceau d'électrons de part et d'autre d'un échangeur de chaleur. Sur la partie HTS, les stacks supraconducteurs sont assemblés par brasage tendre sous vide. Ces stacks sont aussi fabriqués par brasage tendre à partir de câbles. Enfin, une double chemise d'isolation ainsi que différentes connexions sont rapportées par soudure TIG et LASER.

#### **4.6 PET-HPD**

Une équipe du département PH a mis au point un nouveau concept de caméra à positrons (PET-Positron Emission Tomography) à partir de détecteurs HPD (Hybrid Photon Dectectors) initialement conçus pour la physique des hautes énergies. Plusieurs prototypes de chambres céramiques nécessaires à ces détecteurs ont été assemblés. La chambre est constituée d'une fenêtre en saphir, diamètre 114 mm, épaisseur 1.8 mm, brasée sous vide sur un anneau de Niobium. Cet anneau métallique est également assemblé par brasage sur un empilage brasé d'anneaux céramiques et d'électrodes métalliques. Enfin, une bride d'extrémité est rapportée par soudure faisceau d'électrons.

#### **4.7 RFQ**

Un premier prototype de structure accélératrice de type RFQ (Radio Frequency Quadrupole) a été récemment assemblé entièrement par brasage sous vide. La difficulté de cet assemblage est de garantir une stabilité dimensionnelle de l'ordre de 20 microns pour un ensemble constitué d'un corps en cuivre en quatre parties brasées et de brides inox de grandes dimensions (longueur de l'ensemble : 1200 mm, diamètre : 300 mm, poids : ~ 300 Kg). Une méthode de brasage en deux étapes, l'une horizontale et l'autre verticale, a été testée avec succès.

### **5 CONCLUSIONS**

La section Assemblage du groupe MME a rassemblé les principaux moyens disponibles au CERN en matière d'assemblage. La diversité de ces moyens fait du CERN l'Organisation sans doute la plus riche dans ce domaine.

Le rôle de la section est de conserver et renforcer cet outil performant. Une nouvelle gestion des travaux se met également en place pour mieux garantir le bon choix de la méthode d'assemblage et, en finalité, la qualité des prototypes et pré-séries réalisés.