

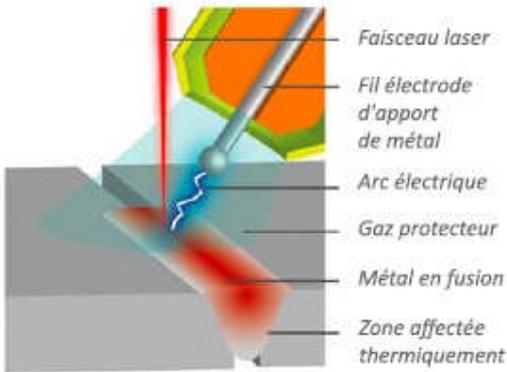
## AVANCEES DANS LE SOUDAGE HYBRIDE LASER-ARC

Octobre 2010

Le soudage hybride laser/arc est un procédé complexe qui associe dans un même bain de fusion le soudage laser avec un soudage à l'arc conventionnel (TIG, MIG/MAG ou plasma). Il cumule les avantages de ces deux technologies pour produire des assemblages de meilleure qualité en un temps réduit.

### LES AVANTAGES DU SOUDAGE HYBRIDE [1; 2]

Le procédé est schématisé sur la figure suivante:



Par rapport au soudage laser, le soudage hybride présente l'avantage d'augmenter les tolérances (jeu d'accostage multipliée par 2 à 4 selon les épaisseurs à souder, position du faisceau). Il offre une meilleure pénétration, tant en largeur qu'en profondeur et permet des applications plus variées. Si le matériau d'apport est bien choisi, la rigidité de l'assemblage est supérieure. La soudabilité métallurgique est améliorée et se traduit par un moindre risque de fissuration en zone fondue.

Comparativement au soudage MIG/MAG, le soudage hybride permet d'augmenter les vitesses de soudage (> 1 m/min) avec une meilleure pénétration, tout en réduisant la zone affectée thermiquement (ZAT). Une étude récente [3] menée par

l'Institut de soudeur a même permis d'atteindre une vitesse de 4 m/min pour la passe racine dite de pénétration, lors du soudage de tubes pour canalisation en acier HLE de grade L555MB (X80).

Par ailleurs, la synergie des deux procédés favorise la stabilité de l'arc, ce qui améliore nettement la qualité du cordon de soudure. L'apport contrôlé de métal influence la composition chimique du métal déposé, d'où une plus grande fiabilité et des coûts de contrôle qualité réduits.

Au plan économique, le recours au soudage hybride serait rentable à partir de 300 km de soudure annuelle dans les faibles épaisseurs (jusqu'à 6 mm) et très rentable dès 22,5 Km dans la forte épaisseur (soudage multipasse).

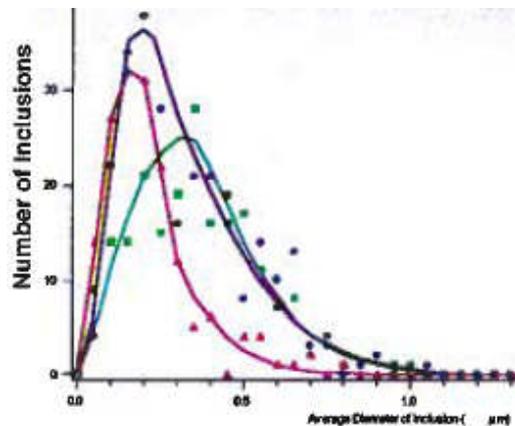
Une étude réalisée par l'université de Pennsylvanie sur des panneaux pour la construction navale [11] illustre la performance du soudage hybride par comparaison avec un soudage à l'arc conventionnel. Les essais concernent le soudage bout-à-bout de tôles en acier HLE d'épaisseurs différentes (4,8 et 9,5 mm). Ils ont été réalisés en milieu industriel. Par rapport au soudage hybride, le soudage à l'arc:

- Est 4 fois plus lent,
- Apporte 4 fois plus de chaleur,
- Engendre une distorsion près de 4 fois plus importante,
- Utilise 6,2 fois plus de métal d'apport.

## ETUDE METALLURGIQUE

### Acier HY-80

Le centre de recherche pour le soudage, l'assemblage et les revêtements (USA) a analysé la macro- et la microstructure, la composition chimique, les inclusions et la dureté de pièces en acier HY-80 soudées par méthode hybride laser-arc [4]. L'étude montre que la microstructure des soudures hybrides est similaire à celle des soudures à l'arc pour un apport de chaleur équivalent, mais qu'elle est nettement améliorée par rapport au soudage laser pour des énergies similaires. En augmentant l'apport de chaleur lors du préchauffage ou pendant la soudure), on observe un accroissement des inclusions de microstructures ferritiques et une diminution de la dureté du métal soudé.



Distribution des tailles d'inclusions dans le métal soudé selon le procédé de soudage.  
Vert: soudage hybride, Bleu: soudage à l'arc,  
Rouge: soudage laser [4]

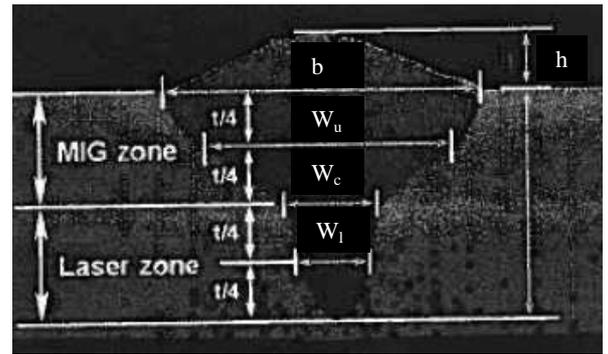
L'étude montre par ailleurs que pour obtenir une structuration typique du soudage hybride (c'est-à-dire qui ne cooresponde pas aux caractéristiques du soudage laser uniquement), le ratio de puissance entre l'arc et le laser doit être au moins égal à deux.

### Alliages d'aluminium

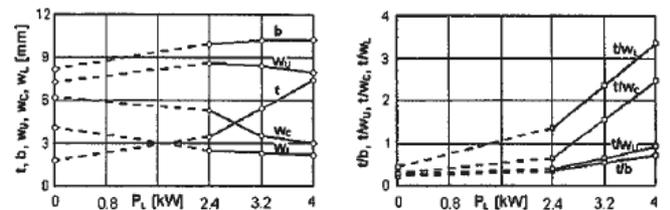
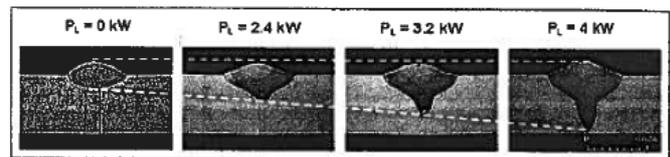
La société Advanced Nuclear Fuels GmbH (Allemagne) a mis au point un système de caractérisation des propriétés d'une soudeure laser-YAG d'alliages d'aluminium. Les paramètres évalués sont la géométrie de la soudeure, la fréquence et le nombre des porosités (soufflures) en fonction de la puissance du laser et la profondeur de pénétration. L'étude de ces différents critères vise à améliorer le processus de soudage hybride.

Le système met en évidence que l'augmentation de la puissance du laser a

principalement pour effet d'augmenter la profondeur de pénétration tout en réduisant la largeur de la zone centrale.

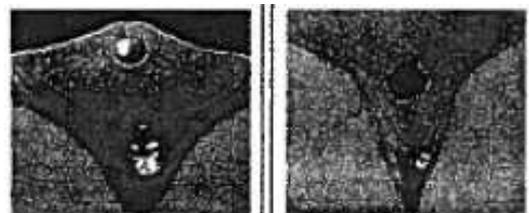


Paramètres de la géométrie du cordon de soudeure [5]



Géométrie de la soudeure en fonction de la puissance du laser [5]

L'un des problèmes principaux du soudage sur alliage d'aluminium provient de la formation de porosités. En soudage Laser et soudage hybride, cette formation est liée aux instabilités capillaires induites par le processus laser. La fréquence des porosités est représentée par le nombre de porosités par unité de longueur. Celui-ci diminue lorsque le ratio puissance laser / profondeur de pénétration augmente.

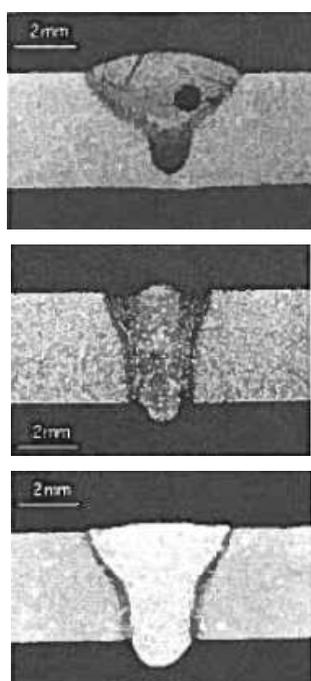


Exemples de porosités observées dans le soudage hybride [5]

On observe une structure dendritique pour les puissances laser faibles, liée à un refroidissement plus lent. Pour les puissances laser plus élevées, la structure dendritique est plus grossière en raison d'un transfert d'énergie plus important dans la zone MIG.

Pour les faibles puissances MIG, une structure cellulaire se forme en partie basse et une structure dendritique grossière apparaît en partie haute. L'accroissement de la puissance MIG conduit à une structure dendritique fine en partie basse. [5]

Ces résultats sont confirmés et complétés par l'étude expérimentale réalisée par l'université de Bourgogne en collaboration avec l'université de Timisoara (Roumanie). Ces travaux ont permis de déterminer les paramètres de soudage optimum pour l'assemblage de tôles d'aluminium (série 2XXX) par soudage hybride (Nd:YAG laser – Arc) [6]



$$E_{beam} = 60 \text{ J/mm}$$

$$E_{arc} = 79 \text{ J/mm}$$

$$E_{beam} = 84 \text{ J/mm}$$

$$E_{arc} = 44 \text{ J/mm}$$

$$E_{beam} = 70 \text{ J/mm}$$

$$E_{arc} = 52 \text{ J/mm}$$

*Section du bain de fusion pour différentes énergies linéaires du laser ( $E_{beam}$ ) et de l'arc électrique ( $E_{arc}$ )*

## PROJET HYPROSOUD [1,2]

### « Maîtrise du procédé de soudage hybride laser-arc : amélioration de la productivité en soudage »

S'étendant de septembre 2007 à mars 2011, le projet Hyprosoud a pour but de développer le soudage hybride laser-arc et d'en favoriser son utilisation industrielle, en augmentant la productivité et en améliorant la soudabilité. Il est piloté par l'Institut de Soudure, et conduit avec les sociétés Air Liquide, Caterpillar, Lohr Industrie, le PIMM (Procédés en Ingénierie et Mécanique des Matériaux, Ensam ParisTech) et le Letam (Laboratoire

d'étude des textures et application aux matériaux, université Paul Verlaine, Metz).

Pour mener à bien ce projet, l'Institut de soudure s'est doté d'une source laser Trumpf à disques pompés par diodes Yb:YAG de 10 kW. La forte puissance de cette source laser TruDisk 10003 permet de réaliser la mise au point de paramètres de soudage hybride sur des assemblages en T en régime débouchant, sur de fortes épaisseurs d'acier, du type S355 ou S700MC. L'équipement comporte deux fibres optiques de 300  $\mu\text{m}$  et 600  $\mu\text{m}$  de diamètre de cœur et de 30 mètres de long.

### Tête de soudage légère et compacte

Air Liquide a développé une tête de soudage hybride laser MIG/MAG qui pèse moins de 10 kg, ce qui permet de la monter sur les robots de soudage couramment utilisés dans les PME. La tête est refroidie par un circuit de refroidissement interne. La tête est très compacte pour pouvoir accéder à des joints de soudure à l'intérieur de pièces exigües.



Pour la partie MIG/MAG, une source de 450 A associée à une torche refroidie par fluide générateur permettent d'utiliser des fils de métal d'apport de diamètre 0,8 à 1,6 mm.



*Soudure en T de deux plaques d'acier de 12 mm d'épaisseur réalisée à 0,6 mètre/min en combinant un faisceau laser de 5000 W avec un arc MIG/MAG.*

## Modélisation

Une première phase a permis de caractériser le procédé par l'étude des cycles thermiques, en utilisant des caméras rapides et thermiques, des mesures par thermocouples et des traceurs dans le bain de fusion. Le laboratoire PIMM a ensuite simulé le comportement du bain de fusion et analysé la pression d'arc à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics™. Le modèle développé permet de réaliser des études prédictives sur les soudures afin de déterminer les température, les niveaux de contrainte résiduelle sur les pièces et les déformations.

## TOLES DE FORTE EPAISSEUR

### Développement du procédé

Le Centre laser de Hanovre (LZH) développe actuellement le soudage hybride de tôles de forte épaisseur: plus de 20 mm pour les aciers et jusqu'à 15 mm pour l'aluminium. Pour réaliser des soudures en une seule passe, l'arc et le laser ont un mouvement pendulaire perpendiculaire au cordon de soudure. L'arc est utilisé pour combler le jeu entre les tôles, alors que le laser sert à souder en profondeur. Le LZH utilise un laser à disque de puissance 16 kW pour ces travaux. [7]

### Modélisation

Le pôle nucléaire de Bourgogne a labellisé le programme Sishyfe, qui vise à développer un logiciel de simulation des déformations induites par le soudage hybride laser-MIG/MAG. Le logiciel prendra en compte la géométrie des pièces, réalisées en tôles dont l'épaisseur est comprise entre 20 et 100 mm. L'enjeu est de proposer une solution de soudage adaptée selon les différents types d'acier, avec un procédé de soudage plus performant et plus rapide. Les acteurs du projet sont Areva, Industeel, Transvalor (Mines ParisTech), ESI Group (prototypage virtuel) ainsi que les laboratoires Armines Cemef. Le budget initial s'élève à 3,1 M€, dont 30% financés par l'ANR. [8]

## TENUE EN FATIGUE

L'université technique de Rhénanie-Westphalie [9] a étudié les caractéristiques en fatigue d'un assemblage réalisé par soudage hybride. Les essais ont porté sur un acier à haute résistance S690Q et un acier structural EH36 (S355), d'épaisseur 15, 20 et 25 mm. Les échantillons ont été soudés en bout-à-bout avec et sans jeu entre les tôles assemblées. Les principales conclusions sont les suivantes:

- Les échantillons EH36 d'épaisseur 15 mm sans jeu montrent une résistance en fatigue largement supérieure à celle des échantillons avec jeu (0,5 mm).
- Pour les échantillons de 20 mm en S690Q et EH36 on observe un comportement en fatigue similaire, bien que les joints sans jeu soient plus lisses que ceux avec jeu. Ceci montre que les aciers à haute résistance sont plus sensibles aux entailles telles qu'un joint soudé, qui diminuent leur durée de vie en fatigue.
- La résistance en fatigue est supérieure de 33 à 36% aux valeurs fournies par les recommandations IIW et EC3.

## DOMAINES D'APPLICATION

De manière générale, le soudage hybride intéresse les industries qui recourent à de forts volumes de soudure: construction métallique, chaudronnerie, ferroviaire, automobile, aéronautique, travaux publics, énergie.

### Energie

Le domaine de l'exploitation pétrolière et gazière souhaite réaliser la passe de fond sur les tronçons de pipeline par soudage hybride monopasse. Ce procédé permettrait en effet de diviser par 15 le temps de travail par rapport à un procédé conventionnel multi-passes.

Dans le secteur du nucléaire, des travaux sont en cours pour évaluer la possibilité de souder des pièces en 316L, IN690, A508, A738... et autres matériaux utilisés dans le domaine. Il n'y a pas encore d'applications industrielles mais les démonstrateurs sont nombreux.

### Automobile

Dans l'automobile, la technologie trouve son application dans l'assemblage de matériaux légers réputés difficiles à souder.

## Ferroviaire

Le ferroviaire teste actuellement la technologie:

- Achat d'un banc de mise au point chez Alstom : tête laser hybride de Cloos dotée d'un septième axe (laser à disque), montée sur un robot de soudage ; soudage des panneaux latéraux des voitures. [10]
- Réalisation d'essais chez le Japonais Kinky Sharyo, qui a mis en évidence une excellente qualité de soudure bout à bout et des vitesses de 5 m/min sur des pièces d'épaisseur 3 mm.

## Construction navale

Dans le domaine de la construction navale, les chantiers Meyer Werft en Allemagne exploitent depuis plusieurs années le soudage hybride pour l'assemblage de panneaux de très grandes dimensions (largeur 20 à 30 m, surface 400 à 750 m<sup>2</sup>). Ces panneaux sont destinés à la fabrication de navires de croisière. Les machines (les plus grandes au monde) sont fournies par Gräbener Maschinenteknik, qui s'est associé les compétences de Trumpf. [12]

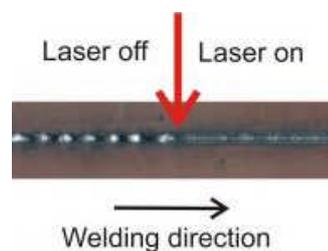


Installation de soudage hybride des chantiers Meyer Werft [13]

L'utilisation de la technologie hybride permet de ne souder les tôles (d'épaisseur 10 mm) que d'un seul côté, d'où un gain de temps et de coût important. En outre, la grande pénétration autorise la limitation des chanfreins à 6°, ce qui réduit considérablement la quantité de métal d'apport nécessaire, l'apport d'énergie et donc aussi le retrait et les déformations sur les panneaux finis.

## SOUDAGE A L'ARC STABILISE PAR LASER

Ce procédé mis au point par le LZH (Centre laser de Hanovre) avec des partenaires industriels n'est pas à proprement parler un mode de soudage hybride, puisque le laser n'est pas employé directement pour souder. Le procédé a été développé dans le cadre du projet FÜLAS. [11]. Le principe consiste à réaliser une soudure à l'arc, en guidant et en stabilisant l'arc par un faisceau laser. Le laser intervient comme un moyen de préchauffage local de la tôle en avant du bain de soudage. Cette technique permet de doubler la vitesse de soudage par rapport à un soudage à l'arc conventionnel, tout en améliorant la qualité du cordon.



Ce nouveau procédé d'assemblage peut être mis en œuvre pour les aciers conventionnels, HLE et THLE ainsi que pour l'aluminium. Il s'applique à toutes les géométries de soudure. Le laser mis en œuvre est de puissance réduite (200 à 400 W), d'où de faibles coûts d'investissement. [14, 15]

## REFERENCES

- [1] Un laser pour Hyprosoud  
<http://www.isgroupe.com/actualite-AFR0081653-H.html>
- [2] Hyprosoud une tête bien faite par Air Liquide  
[http://www.journal-de-la-production.com/lettre\\_electronique/hyprosoud-une-tete-bien-faite-par-air-liquide](http://www.journal-de-la-production.com/lettre_electronique/hyprosoud-une-tete-bien-faite-par-air-liquide)
- [3] Soudage des aciers HLE par procédé hybride laser/arc, Soudage et techniques connexes, nov. Déc. 2008
- [4] Hybrid laser arc welding of HY-80 steel, C. Roepke, Center for welding, joining and coatings research, école des Mines du Colorado, in: Welding journal, août 2009, vol. 88
- [5] Characterisation of weld properties during the Nd:YAG laser MIG hybrid welding of aluminium alloys, Jianchun Ji, Advanced Nuclear Fuels GmbH, Welding and Cutting 8, 2009, n°5

- [6] Influence of process parameters on the laser-arc welding of aluminium alloys, E. Cicala, Université de Bourgogne, in: Welding and material testing, vol. 17, 2008, n°1
- [7] Erhöhte Effizienz beim Schiff-, Rohr- und Turmbau durch Laser-MSG-Hybridschweißprozess  
<http://www.lzh.de/de/publikationen/pressmitteilungen/2010/hybrilas>
- [8] PNB News, mars 2009  
<http://www.pnbinfos.fr/PNB%20NEWSLETTER%20PDF%20mars%202009.pdf>
- [9] Fatigue properties of laser hybrid weldments on structural steel, P. Kucharczyk, in: Steel research int. 80 (2009) n°8
- [10] High performance disk laser technology extends possibilities for laser hybrid welding applications, Welding and Cutting 8, 2009, n°4
- [11] Using hybrid laser-arc welding to reduce distortion in ship panels, S.M.Kelly, The Pennsylvania State University, in: Welding Journal, mars 2009
- [12] Permanente Revolution, Bänder Bleche Rohre, juin 2010
- [13] Meyer werft  
[www.meyerwerft.com](http://www.meyerwerft.com)
- [14] Laser Makes Conventional Welding Faster  
<http://www.lzh.de/en/publications/pressreleases/2010/fuelas>
- [15] Projet FÜLAS  
[http://www.produktionsforschung.de/PFT/verbundprojekte/vp/index.htm?VP\\_ID=1756](http://www.produktionsforschung.de/PFT/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=1756)

**Ensemble** pour les entreprises de la mécanique



*Département  
Veille Technologique et Stratégique*

**Contact**

**Karine Mones**  
Cetim - B.P. 80067  
60304 Senlis Cedex  
Tél. : 03 44 67 35 17  
[karine.mones@cetim.fr](mailto:karine.mones@cetim.fr)



Retrouvez nos notes de veille dans la Mécathèque du site CETIM : <http://www.cetim.fr/cetim/fr/Mecatheque>