

# SOUDAGE AU LASER HYBRIDE DE L'ACIER

## PROJET DE RECHERCHE COLLECTIVE

Le projet HYLAS a démarré début 2006. Ce projet de recherche collective qui s'étale sur deux ans, est subsidié par l'IWT-Vlaanderen (IWT 50739) et concerne le soudage au laser hybride de divers aciers. Au total, une trentaine d'entreprises et centres de recherche sont concernés par HYLAS. La productivité élevée combinée à une bonne qualité de soudure et une meilleure flexibilité sont les raisons de l'intérêt des entreprises pour ce procédé.

Par ir. Wim Van Haver, Centre de Recherche de l'IBS

Traduction par M.C. Ritzen – IBS-BIL

## PROCEDE DE SOUDAGE AU LASER HYBRIDE

L'industrie est le moteur de notre vie. La concurrence croissante avec les pays à faible salaire contraint nos entreprises de l'industrie métallique à innover. Cette innovation doit répondre à des exigences de qualité croissantes, une augmentation de la productivité et une diminution des coûts. Dans ce cadre, l'utilisation des lasers dans la production pour le coupage et le soudage doit être justifiée. Il est reconnu que l'investissement en appareil laser est défendable économiquement si cela répond aux conditions secondaires nécessaires telles que importance des séries et temps de mise en marche. Le soudage au laser a de plus en plus de succès. Les principaux avantages sont: vitesse de soudage élevée, pénétration importante et étroite,

faible déformation, faible apport calorifique, résistance élevée. Du point de vue technologique, un des principaux points négatifs du procédé de soudage au laser est la grande sensibilité aux variations dimensionnelles des pièces à souder telles que le manque d'alignement et une trop grande ouverture par rapport aux procédés de soudage à l'arc traditionnels. Dans la plupart des cas, on n'utilise pas de métal d'apport de telle sorte qu'une ouverture supérieure à 10 % de l'épaisseur de la tôle donne un aspect extérieur et des propriétés de la soudure inacceptables. C'est pourquoi, il faut apporter plus de soin à la préparation du joint afin d'éviter des défauts inacceptables. Ceci va naturellement de paire avec un coût supplémentaire. Le procédé de "soudage au laser hybride" a été développé, dans

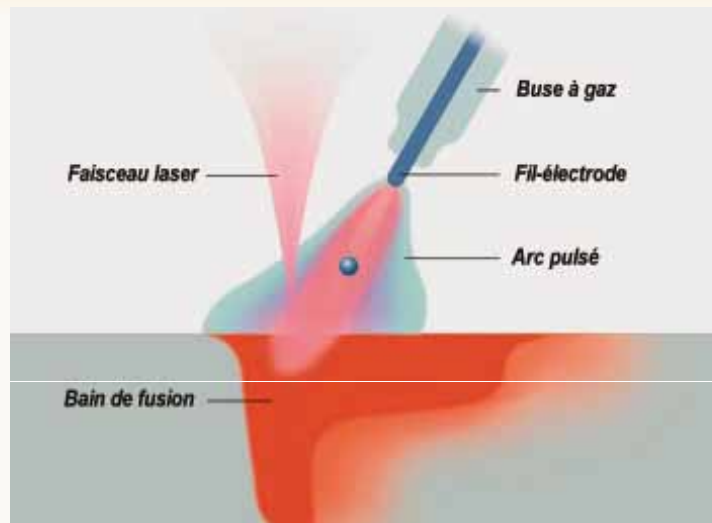


Figure 1: Représentation schématique du procédé de soudage au laser hybride - source: Fronius (Autriche)

les années '70 du siècle dernier par le Prof. Steen à l'Université de Liverpool. En anglais, on utilise différentes dénominations pour la même technique telles que "Hybrid Laser Welding" (HLW), "LaserHybrid Welding" ou "Arc-Augmented Laser Welding". Ici, on combine un procédé au laser avec un procédé de soudage à l'arc dans un même processus. Les lasers typiques utilisés sont le laser CO<sub>2</sub> ou le laser Nd:YAG et récemment aussi le "fibre laser" et le "disc laser". Par procédé de soudage à l'arc, on entend le soudage semi-automatique (MIG/MAG), le soudage TIG ou le soudage au plasma. On constate, en pratique, que, lors de la combinaison du soudage au laser et du soudage à l'arc, on combine essentiellement les avantages des deux procédés. Comme on utilise toujours le soudage MAG comme procédé de soudage à l'arc dans le projet

HYLAS, cet article sera limité à ce procédé.

La figure 1 donne une représentation schématique du soudage au laser hybride avec arc pulsé tandis que la figure 2 montre comment les deux procédés sont combinés dans la réalité, en l'occurrence au moyen d'une tête de soudage hybride. En plus des avantages cités plus haut du soudage au laser, le HLW contrôle, grâce à l'apport du semi-automatique, l'apport de métal dans le bain de fusion. De plus, la puissance de l'arc est meilleur marché que la puissance du laser et est plus efficace du point de vue énergétique. De ce fait, les frais d'investissement nécessaire diminuent et le rendement augmente par rapport au procédé de soudage au laser. Grâce à la synergie des deux procédés, il est possible d'avoir une meilleure pénétration et une vitesse de soudage plus élevée en comparaison avec le soudage au laser. On constate une meilleure stabilité du procédé.

Par conséquent, des défauts dimensionnels plus grands dans la soudure peuvent être beaucoup mieux maîtrisés que dans le cas du soudage au laser sans métal d'apport. L'ouverture maximale dans l'HLW est de 50% de l'épaisseur de tôle par rapport au 10% mentionné ci-avant pour le soudage au laser.

Ceci signifie un monde de différence en ce qui concerne la préparation du joint nécessaire. La pénétration élevée dans l'HLW peut rendre superflue la rotation de la pièce et permet de souder avec pénétration d'un seul côté, ce qui réduit fortement le temps de

Figure 2: Réalisation de têtes de soudage au laser hybride au VITO (à gauche) et à OCAS (à droite)



soudage et surtout le temps de manipulation (à fortiori dans le cas de pièces très lourdes comme dans la construction navale).

Ce sont les principales raisons, pour la plupart des applications déjà existantes, de l'utilisation du soudage au laser hybride plutôt que du soudage au laser ou du soudage traditionnel.

Une autre raison d'estimer le HLW techniquement intéressant, est de nature métallurgique.

Certains aciers ne se laissent pas souder sans métal d'apport car ceci entraînerait des problèmes de soudage ou des propriétés de soudeuse inacceptables. Les aciers duplex en sont un exemple typique: sans utilisation de métal d'apport, on s'écarterait trop du rapport 50% ferrite - 50% austénite dans le métal déposé avec pour conséquence une perte importante des propriétés à la corrosion.

De plus, il faut également tenir compte du fait que dans le HLW, on peut ajouter au métal d'apport des éléments purifiants (par ex. du manganèse pour fixer le soufre) de sorte qu'il y a moins de risque de fissuration à chaud que lors du soudage au laser sans métal d'apport. On peut régler le caractère de la soudure à l'arc ou de la soudure au laser et ainsi influencer également l'apport calorifique qui est d'une grande importance pour de nombreux aciers de la nouvelle génération. Un inconvénient de l'HLW est la grande complexité de ce procédé.

Non seulement, il faut régler les paramètres de l'installation au laser et celle du semi-automatique (on utilise souvent une source de courant synergique), mais les paramètres interactifs sont également très importants. Exemples: distance entre le laser et l'arc, quantité relative en puissance de l'arc par rapport à la puissance du laser et position du laser par rapport à l'arc (d'abord le laser ou l'arc ?). Ceux-ci déterminent l'influence des deux procédés de soudage sur le résultat final.

Un mauvais réglage peut entraîner une rupture de la synergie entre les procédés de sorte que d'importants avantages sont perdus ou même que les deux procédés se gênent mutuellement au lieu de se renforcer. Lors de la recherche des paramètres de soudage optimaux, il est donc important de voir quelles sont les influences. En ce qui concerne l'optimisation des paramètres pour ce procédé, il apparaît qu'une caméra 'high speed', telle que disponible à VITO, est un accessoire très utile (voir plus loin). L'investissement pour une installation de soudage au laser hybride reste naturellement élevé.

La connaissance pratique du HLW appliqué à l'acier est essentiellement aux mains des entreprises allemandes ou scandinaves qui ont consacré beaucoup d'argent à leur propre recherche et développement ou à une recherche collective. Il est clair qu'une recherche approfondie, comme le projet HYLAS, est nécessaire pour ces techniques innovatrices afin de conseiller les entreprises intéressées et ouvrir de nouvelles voies aux entreprises de soudage. Il va de soi qu'il est très important que les centres de recherche acquièrent de l'expérience non seulement pour pouvoir conseiller les entreprises en ce qui concerne l'acquisition d'une telle installation mais également pour permettre du trouble shooting une fois une telle installation dans l'entreprise. La Flandre est bien équipée dans le domaine du HLW: le VITO et OCAS disposent de tels appareils.

Cependant, l'expérience nécessaire relative au HLW de l'acier est très limitée jusqu'à présent. Ce projet veut y mettre fin.

#### PARTENAIRES DU PROJET

Pour l'instant, ce projet HYLAS de recherche collective, subventionné par l'IWT-Vlaanderen, réunit 29 partenaires. Mais la participation d'autres entreprises à ce projet est toujours possible. Ce projet a cours jusque fin 2007.

L'IBS qui a introduit le projet, s'occupe de la caractérisation des soudures réalisées et de la coordination du projet. Il faut noter que, dans le cadre de HYLAS, on n'examinera pas uniquement des soudures au laser hybride car, dans certains cas, des soudures laser et des soudures à l'arc seront réalisées afin de pouvoir établir une comparaison de leur microstructure et de leurs propriétés mécaniques. CLUSTA s'occupe de l'examen du métal de base. Enfin VITO et OCAS sont chargés de l'optimisation et de la réalisation des soudures au laser hybride (ainsi que des soudures au laser). Dans les deux cas, on utilise le procédé de soudage à l'arc MAG avec une source synergique de Fronius. L'installation laser et l'installation périphérique sont différentes chez ces partenaires. Au VITO, on utilise un laser Nd:YAG avec diode de 4,4 kW de Rofin. La tête de soudage hybride a été montée sur un robot ABB (Figure 3).

Par contre, OCAS dispose d'un portique CNC avec un laser CO<sub>2</sub> de 12 kW de Trumpf; l'installation de OCAS est reprise à la Figure 4.

Enfin, les services de Guidance



Figure 3: Equipement expérimental à VITO pour le soudage au laser hybride dans le cadre de HYLAS



Figure 4: Equipement expérimental à OCAS pour le soudage au laser hybride dans le cadre de HYLAS

ACIER	FOURNISSEUR	EPAISS. (MM)	GEOMETRIE DE LA SOUDURE
DC04	Arcelor Gent	1,5	bout à bout
DP600	Arcelor Gent	1,4	bout à bout
S240D	Arcelor Gent	5	bout à bout
Docol 140 DP A M	Sadef	1,8	bout à bout + recouvrement
MS-W 1200	Sadef	3	bout à bout + recouvrement
AISI 304	VITO	3	bout à bout
AISI 316Ti	Ellimetal	12	bout à bout
P355NL1/NH	Ellimetal	12	bout à bout
AISI 316L	Metes	2 à 4	soudure d'angle
X2CrNiMoN 22-5-3	Industeel	10	bout à bout
S235	Femstaal	2 à 6	soudure d'angle
S355	Arcelor	2 à 6	soudure d'angle
S690	Arcelor Gent	6	bout à bout

Tableau 1: Liste des aciers à souder dans le cadre du projet HYLAS (sous réserves)

Tableau 2: Principaux paramètres des soudures au laser hybride examinées par l'IBS

MATERIAU	NUMERO DE LA SOUDURE	VITESSE DE SOUDAGE (MM/MIN)	PUISSANCE DU LASER (W)	APPORT CALORIFIQUE (KJ/CM)
DC04 1,5 mm	VH1/1	7.200	4.400	0,54
	VH1/2	4.800	3.000	0,64
	OH1/1	3.000	3.000	1,33
DP600 1,4 mm	VH2/1	9.000	4.400	0,57
	VH2/2	4.800	4.400	0,81
S240D 5 mm	OH2/1	3.000	3.000	1,14
	VH3/1	1.800	4.400	2,70
	VH3/2	1.200	4.400	3,55
	OH3/1	2.000	6.000	2,85

Technologique subsidiés par l'IWT-Vlaanderen, IBS – CLUSTA – VITO, assurent, durant et après le projet, le transfert des connaissances auprès des entreprises qui peuvent être intéressées par les résultats.

## RESULTATS EXPERIMENTAUX

Durant cette première période, les métaux de base à souder ont été déterminés en concertation avec les partenaires industriels. Parmi les aciers repris au **Tableau 1**, trois ont été soudés jusqu'à présent avec le HLW.

Ceux-ci ont été livrés par Arcelor Gent. Les principaux paramètres des soudures au laser hybride optimisées, examinées par l'IBS, sont repris au **Tableau 2**.

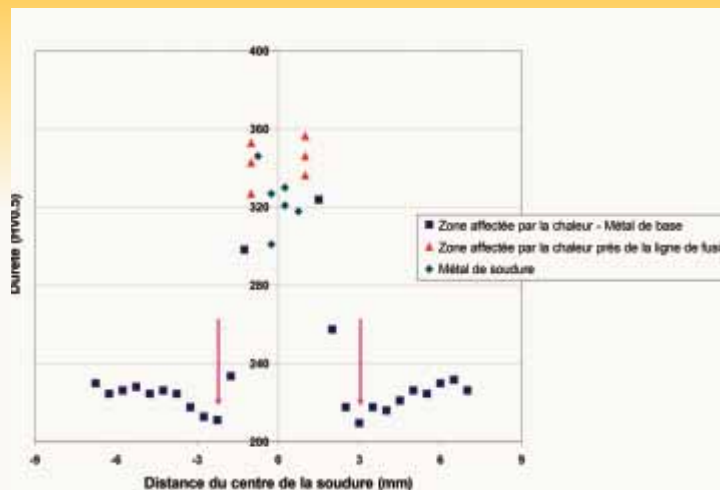
Il faut noter que l'apport calorifique mentionné est en fait une limite supérieure: lors du calcul, on est parti du fait que toute la puissance du laser et de l'arc électrique assure un rendement de 100 % pour la formation de la soudure. Néanmoins, il est clair que, dans chaque cas, l'apport calorifique est très faible. Le métal d'apport a été choisi en concertation avec le fournisseur de métaux d'apport (Soudométal) et les entreprises concernées. Sur base de ce choix, le gaz de protection a été choisi par OCAS et VITO.

L'objectif de la recherche a été, dans un premier temps, de comprendre le processus. Dans certains cas, l'aspect extérieur était sensible aux améliorations. Au stade suivant, on comparera les deux procédés et on examinera quelles tolérances peuvent être posées au joint de telle sorte que la soudure réponde aux critères posés. Ceci doit enfin aboutir à une analyse de coûts.

### • DC04, épaisseur 1,5 mm

L'acier DC04 a été soudé par laser hybride en épaisseur de 1,5 mm par VITO et OCAS. La microstructure du métal de base était constituée de ferrite et de fins carbures. Le carbone équivalent de cet acier était de 0,08 %, ce qui indique que la teneur en éléments d'alliages dans cet acier

**Figure 6:** Coupe métallographique d'une soudure au laser hybride en épaisseur de 5 mm dans l'acier S240D réalisée par VITO avec une vitesse de soudage de 1,8 m/min et une puissance de laser de 4,4 kW



**Figure 5:** Duretés sur une soudure au laser hybride dans le DP600 réalisée par OCAS avec une vitesse de soudage de 3 m/min et une puissance de laser de 3 kW (OH2/1 du Tableau 2)

est faible. Tant VITO qu'OCAS ont utilisé un gaz de protection M21 (5-25% CO<sub>2</sub>, reste Ar). Dans les deux cas, on a soudé avec un fil massif ER70S-G ("Union K 40"). A l'aide d'essais de pliage et de traction, on a constaté que les propriétés mécaniques de la soudure étaient excellentes: toutes les éprouvettes de soudure ont pu résister à un pliage à 180° et lors de l'essai de traction, la rupture s'est faite dans le métal de base.

### DP600, épaisseur 1,4 mm

Cet acier à haute résistance doit sa combinaison entre résistance et bonne déformabilité au traitement thermique spécifique auquel il est soumis durant la fabrication où apparaît une microstructure constituée d'environ 90 % de ferrite et 10 % de martensite ("dual-phase"). Sur base de l'analyse chimique, le carbone équivalent du métal de base a été déterminé à 0,42 %. Pour le soudage au laser hybride, tant VITO qu'OCAS ont utilisé un fil massif ER70S-6 ("Union SG 2-H") et un gaz de protection M21. Aucune fissure n'a été détectée lors de l'essai de pliage à 180°. Il faut noter que la déformation lors de l'essai de pliage n'est pas très homogène: la déformation était concentrée dans la zone

affectée thermiquement (ZAT). Cet adoucissement apparaissant dans une zone très étroite, due au recuit de la martensite présente dans le métal de base, a été prouvé par des mesures de dureté (**Figure 5**).

Les mesures de dureté montrent également qu'on a un durcissement, dans une mesure importante, dans le métal déposé et dans la ZAT près de la ligne de fusion. Dans les soudures réalisées par VITO, la dureté était d'ailleurs, dans cette zone, encore plus élevée (400 – 450 HV<sub>0,5</sub>); ceci est naturellement dû à l'apport calorifique plus faible en raison de la vitesse de soudage plus élevée de telle sorte que le refroidissement se fait plus rapidement et qu'apparaissent des structures de trempe. Durant l'essai de traction, la rupture est apparue dans la zone affectée dans la ZAT à une tension égale à environ 90 à 95 % de la résistance à la traction du métal de base.

### • S240D, épaisseur 5 mm

Cet acier de construction a une microstructure de base constituée de ferrite et de perlite et un carbone équivalent de 0,15. VITO et OCAS ont utilisé le même métal d'apport et gaz de

protection que pour le soudage au laser hybride du DP600. Comme pour le DC04, les propriétés mécaniques étaient excellentes: rupture dans le métal de base durant l'essai de traction et pas de fissuration lors de l'essai de pliage à 180°. Une coupe métallographique d'une soudure au laser hybride dans du S240D est reprise à la **Figure 6**. Il est intéressant de noter que VITO a la possibilité d'enregistrer in situ le procédé de soudage à l'aide d'une caméra "high speed". L'optimisation du procédé de soudage est ainsi facilitée car on peut observer in situ l'influence des paramètres sur le procédé de soudage. Un exemple est montré à la **figure 7**.

Dans l'enregistrement à gauche, la longueur de l'arc est nettement trop courte. Le transfert de métal du métal d'apport (angle supérieur droit) vers le bain de fusion (centre) se fait impétueusement et irrégulièrement avec de nombreuses projections et une qualité de soudure discutable. Dans l'enregistrement à droite, la longueur d'arc a été augmentée. La tache claire dans le bas à gauche est le "keyhole" du laser. La goutte de métal liquide (centre) se détache très bien de l'extrémité du fil et tirée vers le point le plus chaud – d'où la forme de goutte allongée.

Entre la goutte et l'extrémité du fil, on peut apercevoir le plasma de l'arc.

## CONCLUSION

Jusqu'à présent, trois aciers différents ont été soudés au laser hybride. Des vitesses de soudage élevées ont été atteintes (> 1 m/min) et en général, de bonnes propriétés mécaniques ont été obtenues. Seul dans l'acier DP600, un adoucissement a été constaté dans la zone affectée thermiquement. Sur les aciers déjà étudiés, on appliquera également le soudage au laser et le soudage MAG afin de pouvoir établir une comparaison.

De plus, on examinera quelles sont les préparations de joint nécessaires (en termes de tolérances) pour obtenir de bonnes soudures au laser hybride. Il va de soi que les autres aciers seront également soudés au laser hybride.

Enfin, les entreprises partenaires peuvent, à l'aide d'une estimation de coût, décider si un investissement dans ce procédé de soudage innovateur est justifié pour leur propre application et acier.

Les entreprises intéressées peuvent toujours participer à ce projet. Pour ce faire, elles peuvent contacter l'IBS.

(Contact: IBS) □

**Figure 7:** Enregistrement par caméra high speed du VITO des soudures au laser hybride avec arc pulsé pour deux longueurs d'arc différentes

