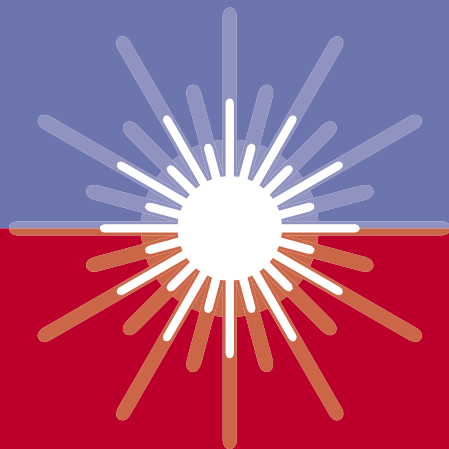


# MISE EN OEUVRE DU SOUDAGE LASER

UTILISATION INDUSTRIELLE DU LASER



Alsace Media Science • mediascience@amsnscience.com • Collecton Traitement et usinage des matériaux par laser • mars 2007 • reproduction interdite •



**IRÉPALASER**

Parc d'Innovation  
F-67400 Illkirch  
T : + 33 (0)3 88 65 54 00  
F : + 33 (0)3 88 65 54 01  
irepa@irepa.u-strasbg.fr  
www.irepa-laser.com



**IRÉPALASER**

## Sommaire

- 4 Principe du soudage laser
- 4 Comparaison avec les autres procédés
- 6 Avantages de la technologie laser
- 6 Matériaux et soudage laser
- 10 Techniques particulières
- 14 Règle de conception
- 17 Contrôle process
- 18 Applications industrielles
- 20 Procédés annexes
- 22 Conclusion

Le soudage est, aujourd'hui une technique d'assemblage innovante et utilisée dans tous les domaines. Si cette technique est courante, certains de ses procédés sont encore mal connus et sous-utilisés. Le procédé de soudage par laser fait partie de cette catégorie. Malgré une étiquette de procédé complexe, il présente des avantages inégalés tant d'un point de vue technique qu'économique.

Pour promouvoir ce procédé, deux professionnels du laser aux compétences complémentaires se sont associés :

- ▶ **TECHLASE**, spécialiste dans les travaux de sous-traitance en soudage et traitements de surface par laser,
- ▶ **IREPA LASER**, centre technique spécialisé dans les applications industrielles des procédés laser pour le traitement et l'usinage des matériaux.

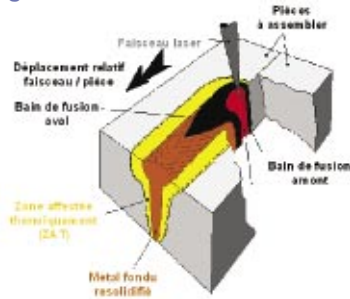
Ces deux sociétés se veulent être un moteur pour le développement du soudage laser dans le milieu industriel en offrant à l'utilisateur potentiel une approche industrielle de terrain avec un appui technique (études et formation) largement reconnu.

Dans cette même optique, ce fascicule vous aidera, si ce n'est déjà fait, à découvrir l'éventail des possibilités très larges qu'offre la technologie laser.

Vous serez ainsi bien armé pour enrichir, moderniser, optimiser, dynamiser votre secteur. N'hésitez pas à nous contacter pour toutes vos questions.

Bonne découverte !

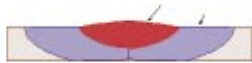
## ■ Principe du soudage laser



Le soudage laser est un procédé de soudage à haute densité d'énergie. Cette caractéristique permet d'obtenir la formation d'un capillaire rempli de vapeurs métalliques.

Un bain de métal fondu se développe tout autour de ce capillaire. Le déplacement relatif de celui-ci engendre la formation d'un joint soudé.

C'est grâce à ce capillaire que l'énergie thermique est distribuée non plus en surface mais sur toute la profondeur de ce "trou" rempli de vapeurs métalliques autour duquel la matière est fusionnée. Cette caractéristique permet d'obtenir des cordons très étroits et fortement pénétrants.



Procédé traditionnel



Soudage laser

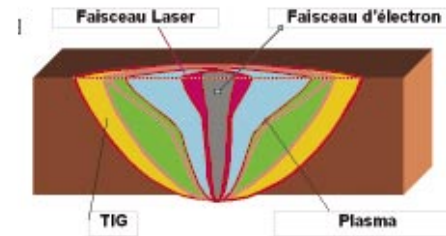
## ■ Comparaison avec les autres procédés

Comme nous l'avons vu précédemment, la répartition de l'énergie thermique sur toute la profondeur du capillaire permet d'obtenir une morphologie de zone fondue particulière.

### Cette évolution aura d'autres conséquences :

- ▶ Absence de chanfrein à réaliser sur les bords à assembler
- ▶ Absence de matériau d'apport
- ▶ Grande vitesse d'avance
- ▶ Absence de contact
- ▶ Accessibilité en fond de gorge
- ▶ Faible déformation
- ▶ Profondeur de soudage maîtrisée
- ▶ Zone affectée thermiquement réduite

Le schéma ci-dessous permet de comparer, à pénétration identique, le volume fondu pour différents procédés d'assemblage.



D'autre part cette technologie supporte parfaitement l'automatisation du procédé. Cet aspect permet une qualification rapide et surtout une parfaite reproductibilité du process.

Soudure à l'arc procédé MAG.



Soudure laser.



## ■ Avantages de la technologie laser

Nous pouvons classer les avantages de cette technologie en fonction de la conduite automatique mais également en fonction des spécificités du laser.

### Conduite automatique

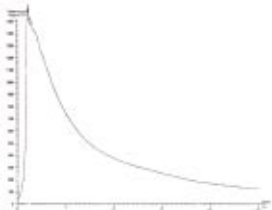
- Maîtrise du procédé
- Reproductibilité
- Qualité
- Grande disponibilité de l'outil
- Pas de reprise
- Ergonomie

### Spécificité du laser

- Précision et finesse du faisceau
- Productivité élevée
- Possibilité d'accéder dans des zones difficiles
- élévation thermique faible et maîtrisée
- Faible déformation
- Soudage sans contact
- Accessibilité sur une seule face lors du soudage par transparence

## ■ Matériaux et soudage laser

### ► Cycle thermique



La spécificité du soudage laser permet d'atteindre de grandes vitesses de production et de ce fait de réduire les zones affectées thermiquement. Cette particularité engendre un cycle thermique très sévère pour le matériau.

Pour garantir un joint soudé satisfaisant, la gestion de ce cycle thermique est importante essentiellement pour les matériaux sensibles à la trempe. Certains paramètres opératoires ont une influence importante et permettent d'assurer un cycle thermique tout à fait répétable et acceptable pour les matériaux à assembler. Le procédé de soudage laser permet de réduire de façon considérable l'élévation en température, on enregistre ainsi de faibles déformations géométriques.

### ► Soudabilité des matériaux métalliques

Une opération de soudage par fusion engendre une série de transformations qui va, en zone fondue, de l'élaboration d'un matériau nouveau jusqu'aux traitements thermiques en zone affectée thermiquement et ce dans un temps très court. Comme dans tous les autres procédés de soudage, seuls les matériaux qui acceptent ce cycle thermique peuvent être assemblés par laser. Ici c'est la composition chimique du matériau qui va dicter son comportement.

D'autre part, certains éléments chimiques tels que le soufre, le phosphore, le plomb, le niobium, rendent les matériaux sensibles à la fissuration en cours de solidification (fissuration à chaud). Pour éviter ce phénomène, on peut être amené à restreindre la teneur de ces éléments.

Ainsi d'une façon très générale nous pouvons classer les matériaux selon les quelques règles citées ci-dessous :

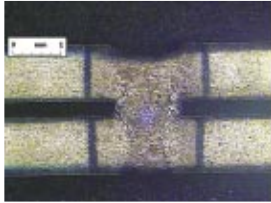
### ■ Les aciers au carbone

Certains de leurs éléments d'addition provoquent un durcissement et de ce fait une fragilité. Pour estimer la faisabilité opératoire du soudage on utilise une formule associant les éléments d'addition ayant une action équivalente à celle du carbone :

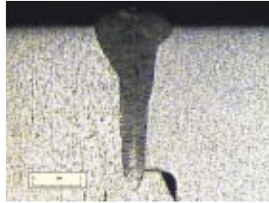
Formule du carbone équivalent :

$$C_{\text{eq}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

Pour des teneurs inférieures à 0,4 l'opération de soudage ne pose pas de difficulté particulière. Au-delà, la gestion des paramètres opératoires doit être plus appropriée. Dans certains cas le préchauffage peut même être nécessaire pour aboutir à une soudure sans défaut.



Assemblage par transparence d'un acier au carbone.



Assemblage bout à bout d'un acier inoxydable austénitique.

### ■ Les aciers inoxydables

**Il existe quatre grandes familles d'aciers inoxydables :**

- Les aciers inoxydables austénitiques qui ne présentent pas ou peu de problèmes de soudage hormis la fissuration à chaud pour des teneurs en ferrite < 3-5%.
- Les aciers inoxydables ferritiques qui se soudent très bien sous faisceau laser contrairement aux procédés traditionnels grâce à une vitesse de soudage importante.
- Les aciers austénito-ferritiques qui se soudent bien sous faisceau laser mais nécessitent une analyse particulière des caractéristiques de corrosion en zone fondue.
- Les aciers inoxydables martensitiques qui de par leur teneur en carbone sont très sensibles au durcissement et se soudent très difficilement.

### ■ Les alliages de nickel

Ils présentent une bonne soudabilité, cependant une attention particulière sera apportée sur la protection gazeuse.

### ■ Les alliages de titane

Avec une protection gazeuse parfaite, ils présentent une bonne soudabilité en laser, tout en conservant les caractéristiques du matériau. Ces bons résultats sont liés au cycle thermique rapide.

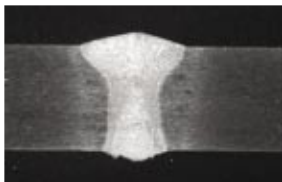
### ■ Les alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont classés par familles en fonction de leur composition chimique. Certains d'entre eux peuvent voir leurs caractéristiques mécaniques évoluer par traitement thermique.

Au niveau du soudage il est important de rappeler que les alliages d'aluminium ont une conductivité thermique quatre fois supérieure à celle de l'acier et un coefficient de dilatation deux fois supérieur à celui de l'acier. Ces propriétés spécifiques imposent l'utilisation de haute densité d'énergie et, dans la majorité des cas, l'utilisation d'un fil d'apport pour éviter la fissuration lors de la solidification. On peut également relever, dans certains cas, des difficultés opératoires pour l'amorçage du capillaire

Pour cette catégorie de matériaux, le soudage laser permet des assemblages avec des faibles zones fondues et des zones affectées thermiquement faibles.

SÉRIE	ALLIAGES D'ALUMINIUM ÉLÉMENT PRINCIPAL D'ADDITION	SENSIBLE AUX TRAITEMENTS THERMIQUES	SOUDABILITÉ
1XXX	Aluminium pur (teneur en Al > 99%)	Non	Bonne
2XXX	Alliages d'aluminium - cuivre	Oui	Bonne à moyenne en fonction de l'alliage
3XXX	Alliages d'aluminium - manganèse	Non	Bonne
4XXX	Alliages d'aluminium - silicium	Oui	Bonne à moyenne en fonction de l'alliage
5XXX	Alliages d'aluminium - magnésium	Non	Bonne
6XXX	Alliages d'aluminium - magnésium - silicium	Oui	Bonne
7XXX	Alliages d'aluminium - zinc (sans ou avec cuivre)	Oui	Bonne à moyenne en fonction de l'alliage
8XXX	Alliages d'aluminium - lithium	Oui	Bonne à moyenne en fonction de l'alliage



Assemblage bout à bout d'un alliage d'aluminium.

### Remarque

Certains des matériaux cités peuvent subir des traitements thermiques augmentant leurs caractéristiques mécaniques. Dans ce cas il est important de définir la position de l'opération de soudage par rapport au traitement de qualité.

Dans le cas d'un soudage sur pièces traitées, la forte densité d'énergie associée à une vitesse importante limite de façon drastique les zones d'abattement mécanique.

## ■ Techniques particulières

### ► Préchauffage

Nous venons de voir que le cycle thermique imposé au matériau est très rapide. Pour contrer ce phénomène il est possible d'associer, avant soudage, un préchauffage qui limitera de façon importante la vitesse de refroidissement. Pour conserver la productivité du soudage laser la technique de préchauffage la plus couramment utilisée est le préchauffage par induction.

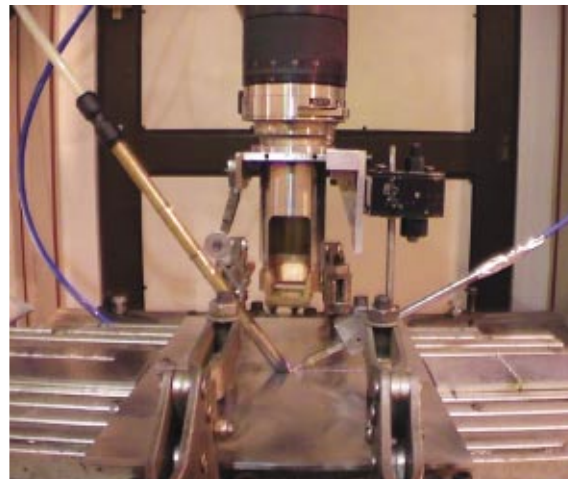


Soudage avec préchauffage par induction.

Ainsi il sera possible d'utiliser une palette de matériaux plus performants tout en maintenant une haute qualité de joint soudé.

### ► Utilisation d'un fil d'apport

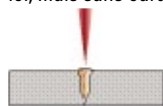
L'absence de chanfrein à remplir autorise le soudage sans métal d'apport. L'utilisation d'un fil d'apport n'est indispensable que lorsqu'il est nécessaire d'intervenir sur la composition chimique de la zone fondue par suite de vaporisation de certains éléments ou pour des problèmes métallurgiques. Le cas typique correspond au soudage de certains alliages d'aluminium.



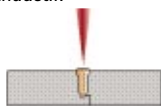
Mise en oeuvre du soudage avec fil d'apport.

## ► Conception des joints soudés laser

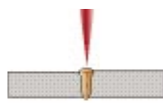
La technologie laser permet les conceptions traditionnelles comme par exemple le soudage d'angle ou l'assemblage bout à bout, mais l'absence de contact, la finesse du faisceau, ainsi que l'accessibilité d'un seul côté donnent des avantages au laser. Quelques conceptions types sont présentées ici, mais sans caractère exhaustif.



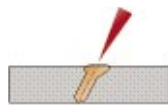
Soudure bout à bout à pénétration partielle



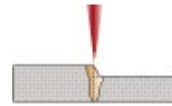
Soudure bout à bout avec plan de joint décalé



Soudure bout à bout avec pénétration complète



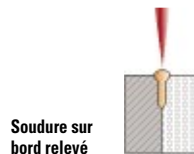
Soudure bout à bout avec plan de joint incliné



Soudure bout à bout d'épaisseurs différentes



Soudure bout à bout avec interpénétration



Soudure sur bord relevé



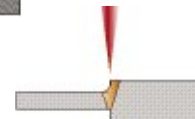
Soudure sur bord relevé avec fusion complète de l'épaisseur



Soudure bout à bout d'épaisseurs différentes



Soudure bout à bout sur bords non alignés



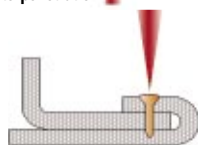
Soudure bout à bout d'épaisseurs différentes



Soudure en T



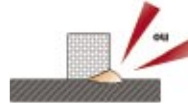
Soudure en T par transparence



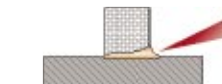
Soudure par transparence du bord rabattu



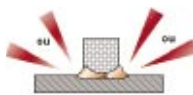
Soudure à clin



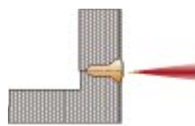
Soudure d'angle



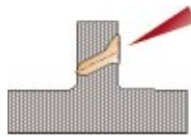
Soudure d'angle à forte pénétration



Soudure d'angle avec interpénétration



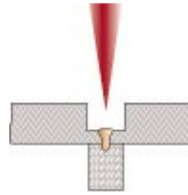
Soudure bout à bout à pénétration partielle pour assemblage angulaire



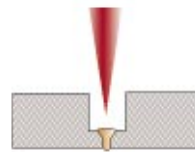
Soudure bout à bout avec préparation inclinée pour assemblage angulaire



Soudure en L



Soudure par transparence en fond de gorge



Soudure bout à bout en fond de gorge

## ■ Règles de conception

### ► Règles générales

Le procédé de soudage laser permet de mettre en œuvre toutes les configurations d'assemblage. Cependant, la finesse de la zone fondue et l'absence de métal d'apport imposent deux conditions essentielles :

- accostage sans jeu
- accostage sans chanfrein

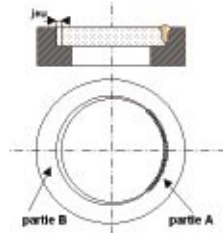
Les pièces à assembler doivent être exemptes de salissure comme, par exemple, graisse, huile, oxyde, peinture. La présence de ces corps étrangers peut provoquer des perturbations lors de l'interaction faisceau pièce qui peuvent aller jusqu'à l'expulsion du bain fondu. Une attention particulière doit être apportée lors du soudage par transparence d'éléments revêtus (tôle galvanisée par exemple).

Toute opération de soudage engendre l'apparition de contraintes, il est souhaitable de ne pas les cumuler avec des effets d'entaille et des contraintes de fonctionnement.

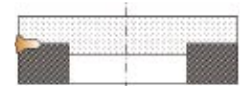


D'autre part ces contraintes engendrent des déformations. Même si la technologie laser n'a que peu d'impact thermique on enregistre systématiquement des déformations. Celles-ci peuvent induire une évolution du jeu initial.

Lors du soudage axial d'un bouchon, les contraintes vont tendre à tirer le bouchon vers le cordon en cours de formation. On verra apparaître alors une évolution du jeu en fin de trajectoire.



Une conception axée sur une trajectoire radiale évitera cette déformation



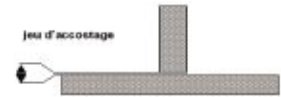
### ► Assemblage bout à bout



L'absence quasi systématique de matériau d'apport et la finesse du faisceau laser imposent un jeu  $< 0,05 \times$  épaisseur.

### ► Assemblage d'angle

De la même façon que pour le soudage bout à bout, il est important de limiter le jeu d'accostage à  $< 0,05 \times$  épaisseur.



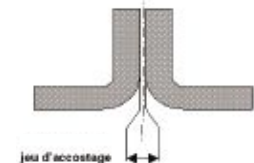
### ► Assemblage par transparence



Dans cette configuration, le jeu entre les épaisseurs à assembler provoque un évasement du métal liquide et également un manque de matière sur la partie supérieure. Le jeu d'accostage est  $< 0,2 \times$  épaisseur.

### ► Assemblage sur bord relevé

La problématique est identique à celle du soudage bord à bord avec un jeu  $< 0,1 \times$  épaisseur.





## ■ Contrôle Process

**La conduite automatisée du procédé permet une reproduction des paramètres opératoires.**

**Cependant certains paramètres doivent être contrôlés pour assurer la qualité du joint soudé.**

### ► Puissance du laser

Parmi les caractéristiques du faisceau laser, la puissance délivrée sur la pièce est un paramètre important, puisqu'il intervient directement sur l'énergie délivrée lors du soudage. Cette caractéristique est mesurée par l'intermédiaire d'un calorimètre.

### ► Examen métallographique

C'est un contrôle destructif qui consiste à couper au travers d'un cordon pour s'assurer :

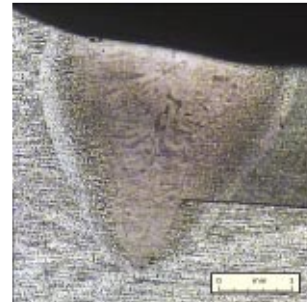
- de la pénétration atteinte
- de la morphologie du cordon
- de la bonne position du faisceau par rapport au plan de joint
- de la structure métallurgique des diverses zones
- de la santé interne du cordon, porosité, fissuration

### ► Contrôles non destructifs (CND)

Tous les CND traditionnels peuvent être mis en place après soudage laser, on portera cependant une attention particulière à la très faible dimension des défauts tels que porosités et fissures. Les contrôles de ressuage et/ou magnétoscopie permettront une détection des défauts éventuels de surface, alors que les ultrasons, les courants de Foucault et/ou la radiographie permettront de contrôler la santé interne du cordon.

## ■ Applications industrielles

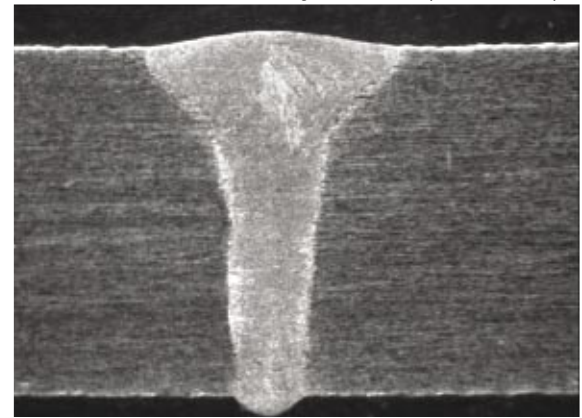
La forte productivité qu'offre le laser lui a permis de s'implanter très aisément dans l'industrie automobile. Aujourd'hui on soude par laser des éléments de boîte de vitesse, des tiges d'amortisseur, des arbres à cames, des arbres de direction, des éléments de turbo, etc.



Soudage de bouchon d'arbre à cames.

Dans l'aéronautique le laser est utilisé dans l'assemblage de réacteurs, d'éléments de voilure, etc.

Soudage d'Incomel 718 pour l'aéronautique.



Cependant les PME peuvent également trouver un intérêt fort et investir dans les procédés de soudage laser. En dehors de l'aspect spécifique du soudage, l'exemple présenté ci-dessous met en évidence l'innovation apportée par la technologie laser dans la fabrication d'échangeurs thermiques pour l'industrie agro-alimentaire. La chaîne de fabrication comportait alors une phase de mise en forme par explo-formage suivie d'un soudage à la molette et manuel.

L'utilisation du soudage laser a permis, grâce aux résistances mécaniques obtenues, d'assembler des éléments plans puis de réaliser la phase de mise en forme par gonflage hydraulique de la poche. Cette modification dans la ligne de production a permis une simplification et une augmentation importante de la productivité.



Plaque d'échangeur thermique soudée au laser.

## ■ Procédés annexes

**L'apport thermique parfaitement gérable et très localisé permet d'utiliser la technologie laser dans des applications annexes au soudage.**

### ► Le brasage tendre

Il s'agit ici d'assembler des éléments en utilisant un matériau d'apport. La température atteinte lors du process est inférieure à celle des matériaux de base, seul le matériau d'apport est porté à fusion. Les températures sont inférieures à 450°C. La chauffe est globale dans la partie à brasier. Les applications s'orientent vers des applications comme l'électronique et la micro électronique.

### ► Le soudage hybride

Comme nous l'avons vu le soudage laser n'est pas très tolérant vis-à-vis des jeux de positionnement. C'est une des raisons pour laquelle la technologie hybride a été développée. Il s'agit de cumuler le faisceau laser à une autre technologie de soudage électrique (MIG MAG TIG ou PLASMA). La synergie créée par le cumul de ces énergies permet de conserver et même d'augmenter la vitesse de soudage laser tout en acceptant des jeux de positionnement. Cette technologie est utilisée par exemple dans l'industrie navale. Les gains substantiels sont la productivité et surtout la réduction des déformations après soudage.

Mise en oeuvre du soudage hybride YAG+MIG/MAG



## ► Le soudo-brasage

Le procédé est proche de celui du brasage. Il s'agit d'assembler des pièces avec un matériau d'apport dont la température de fusion est inférieure à celle des métaux de base. Les températures atteintes sont supérieures à 450°C ce qui permet d'obtenir des résistances mécaniques importantes tout en limitant les déformations. L'apport thermique se fait de proche en proche. Cette technologie est de plus en plus mise en œuvre dans l'automobile pour l'assemblage d'éléments de carrosserie interne et externe.

Exemples de joints soudés-brasés.



Coupe métallographique de joint soudo-brasé laser.

Mise en oeuvre du soudo-brasage laser.

## ■ Conclusion

Nous pouvons dire aujourd'hui que le procédé de soudage par laser est un procédé complètement opérationnel aussi bien d'un point de vue technologique qu'économique. Il trouve sa place dans tous les secteurs de l'industrie, de l'horlogerie au médical, de la micromécanique jusqu'au domaine du transport en passant par l'énergie.

**Le procédé de soudage laser est en train de gagner ses lettres de noblesse grâce à plusieurs éléments :**

- Les sources laser qui ont fortement évolué et deviennent simples d'utilisation et très fiables.
- Les machines et robots qui permettent de respecter les conditions opératoires liées à l'utilisation du laser.
- Les industriels comme TECHLASE qui aujourd'hui sont parfaitement formés dans le domaine et bénéficient pour certains d'une très large expérience du soudage laser.
- Les centres techniques et d'expertise qui assurent le développement et l'industrialisation de ce procédé.

**Tout concourt à ce jour, à ce que cette technique, en cours d'implantation, prenne une place majeure dans l'industrie des cinquante prochaines années.**

**Nous espérons, au travers de ce fascicule avoir provoqué en vous, lecteur, la petite étincelle : le soudage laser ? Pourquoi pas ?**

