



Soudage laser de l'aluminium

Maurice Duval

18 avril 2018

Soudage laser de l'aluminium

Auteur : Maurice Duval

1. Introduction

Il reste quelques souvenirs de l'Exposition Universelle de 1967 à Montréal, dont le pavillon de la France, devenu en 1993, le Casino de Montréal. Sur un étage du pavillon consacré aux sciences on nous présentait, en 1967, un laser CO² constitué d'un tube de 15 cm de diamètre par 20 m de longueur qui générait plusieurs milliers de watts, un record de puissance à l'époque. C'était une année ou deux après la première utilisation du laser en soudage. Le laser est aujourd'hui utilisé dans un très grand nombre de domaines, et le soudage laser est devenu une technologie mature.

2. Principe de fonctionnement du laser

Le principe physique de fonctionnement du laser remonte à Albert Einstein qui, en 1917, proposait le principe de l'émission de lumière stimulée pour expliquer l'équilibre radiatif dans le rayonnement thermique. Le principe est simple et illustré à la figure 1. Dans un atome les électrons ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie spécifiques. On peut faire passer un électron dans un état d'énergie inférieur à un niveau supérieur (état excité) en lui fournissant l'énergie requise $h\nu$ (absorption). Le retour à l'état initial se produit de façon spontanée en émettant un photon (lumière), dont l'énergie $h\nu$ correspond à l'écart entre les deux niveaux (émission spontanée). Un photon qui a exactement cette énergie et qui interagit avec un électron excité va aussi provoquer le retour à l'état initial, c'est le principe de l'émission stimulée où le photon est émis dans la direction du photon « déclencheur » de même énergie $h\nu$. Dans un milieu donné, il s'établit un état d'équilibre entre absorption et émission.

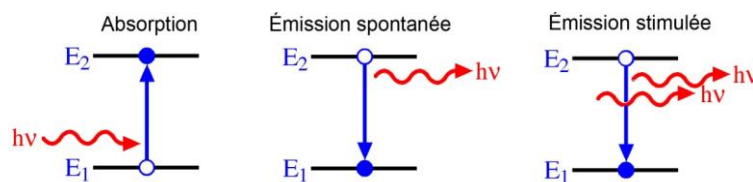


Figure 1

Les recherches entreprises à partir des années 1950 ont conduit, de développement en développement, au premier laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), le laser à rubis développé par Théodore Maiman en 1960 (voir schéma figure 2).

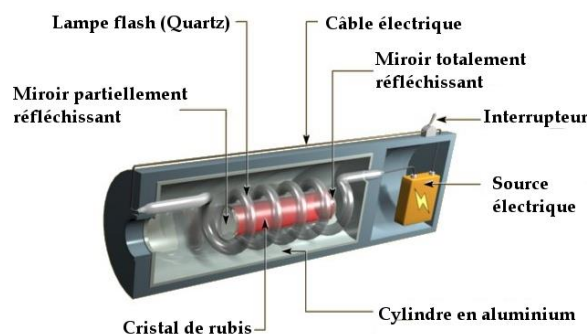


Figure 2

Le long cristal cylindrique de corindon transparent dopé au chrome ($\text{Cr}:\text{Al}_2\text{O}_3$) sert de milieu amplificateur où la lumière provenant de la lampe flash fait passer les électrons du chrome dans un état excité (pompage optique). L'émission stimulée ayant un caractère directionnel, la fraction lumineuse en mesure de faire un va-et-vient entre les miroirs va amplifier l'émission dans l'axe du cylindre. Le faisceau laser correspond à la lumière monochromatique qui s'échappe par le miroir semi-réfléchissant.

De nombreux milieux amplificateurs peuvent être utilisés. Pour le soudage par faisceau laser (*laser-beam welding, LBW*) les milieux amplificateurs pour les sources laser sont le gaz CO_2 (figure 3) et les grenats d'yttrium-aluminium ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopés au néodyme ($\text{Nd}:\text{YAG}$) ou à l'ytterbium ($\text{Yb}:\text{YAG}$) [1]. La fréquence de la lumière du faisceau laser dépend du milieu excité. Pour la source laser CO_2 , l'air est transparent à la fréquence ($10.6\mu\text{m}$) du faisceau produit et le contrôle de son orientation est obtenu par un jeu de miroir. À la fréquence des lasers YAG (figure 4) les fibres optiques sont transparentes ce qui présente un avantage pour canaliser et diriger le faisceau laser. L'énergie peut ainsi être transmise efficacement jusqu'à 200 m.

Les équipements exploitant la technologie laser ont commencé à être utilisés vers le début des années 1980 pour le soudage des métaux en production industrielle.

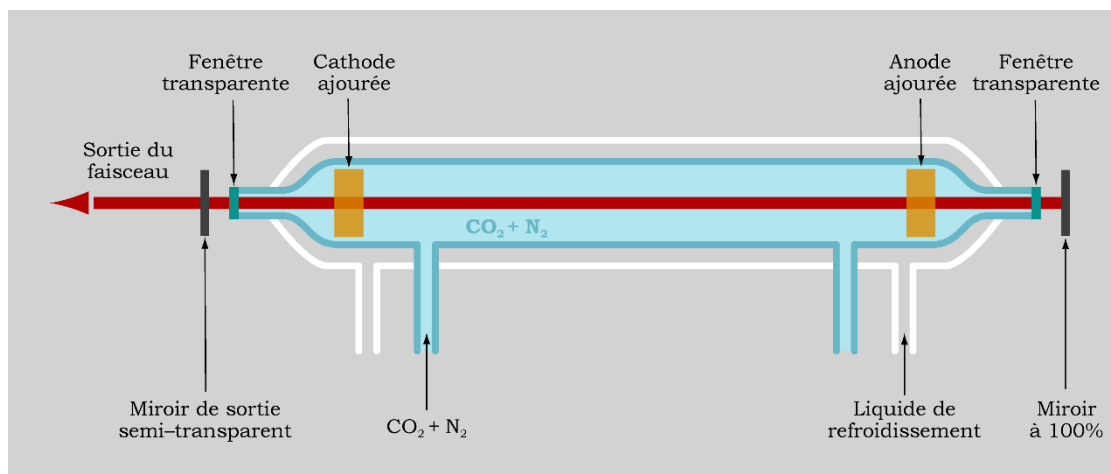


Figure 3 – Schéma d'un laser au CO_2 [2, 3] capable de générer une puissance de sortie de 0.7 kW par mètre de longueur du tube amplificateur.

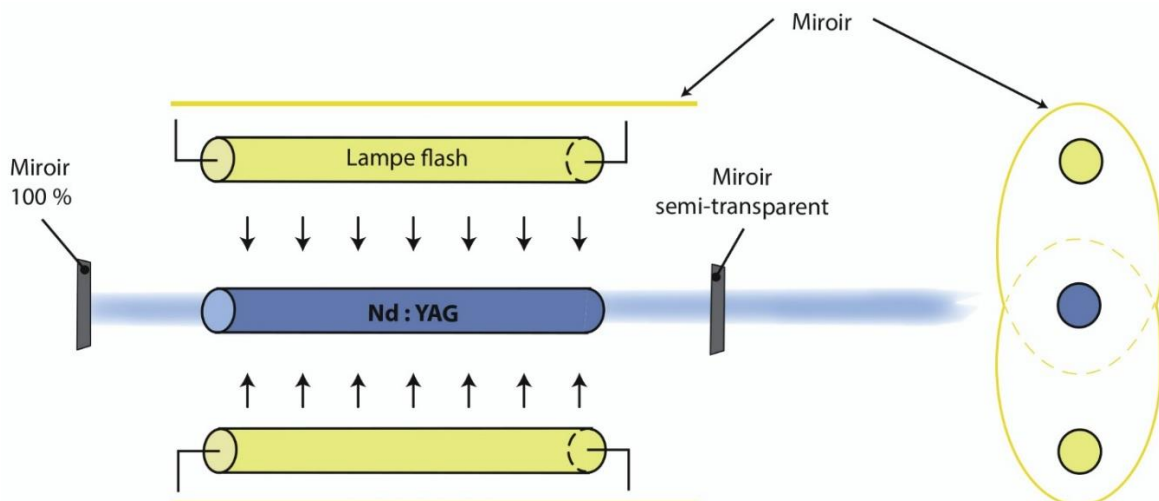


Figure 4 – Schéma d'un laser YAG

3. Le soudage laser

Les sources laser ont permis de développer un procédé de soudage grâce à la densité d'énergie (10^5 à 10^8 W/cm²) du faisceau de lumière produit qui est de 10 à 10000 fois celle produite par le soudage à l'arc. Le faisceau d'énergie provenant d'une source laser de 1 à 80 kW concentrée par un système de focalisation (lentilles, miroirs) sur un diamètre de point focal aussi fin que 100 à 1000 μ m (0.004 à 0.040 pouce) permet d'obtenir la formation quasi instantanée d'un capillaire rempli de vapeurs métalliques (figure 5). Un mince bain de métal fondu se forme autour de ce capillaire (trou de serrure, « keyhole »). Le déplacement du faisceau laser le long du joint génère la solidification à l'arrière et la fusion à l'avant du mouvement ce qui assure la formation d'un joint soudé. À cause de la grande réflectivité de l'aluminium, on doit utiliser des densités d'énergie minimale de 10^8 W/cm² pour amorcer ce soudage. 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 sur une faible épaisseur. Cette caractéristique permet d'obtenir des cordons très étroits et fortement pénétrants. La faible épaisseur de la zone fondue qui assure une solidification très rapide ($> 10^5$ °C/s) permet d'atteindre des vitesses de soudage très élevées (2 à 20 m/minute).

Selon les alliages d'aluminium à souder et l'aspect attendu de la soudure, un gaz inerte (Hélium + Argon) et un métal d'apport sous forme de poudre fusible ou de fil peuvent être apportés sur le bain de fusion afin d'augmenter ses performances et protéger la zone de soudure de l'oxydation par l'air ambiant.

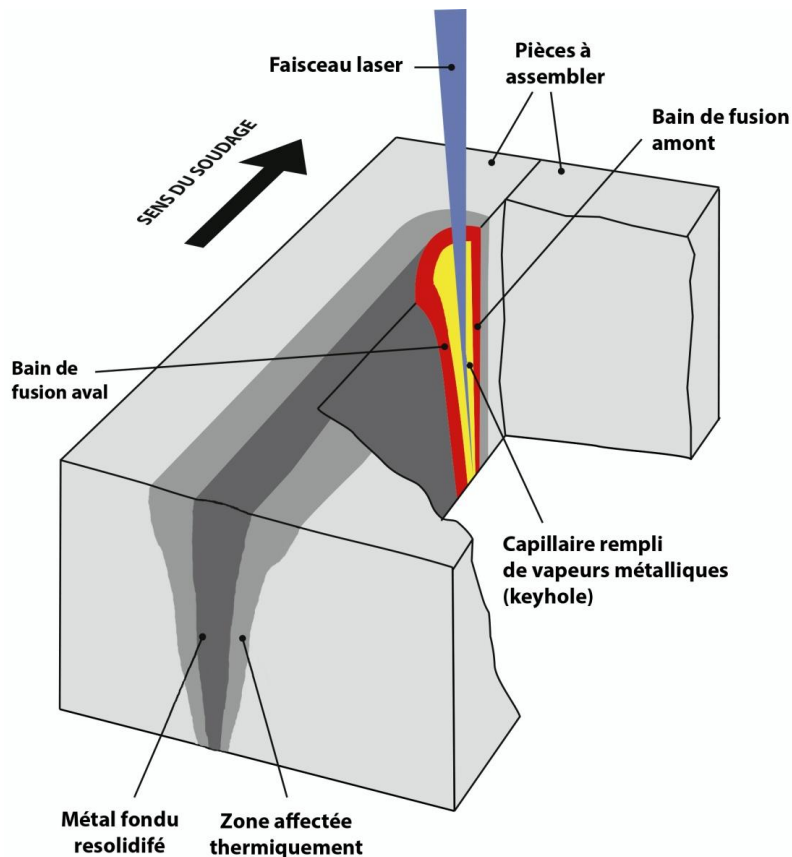


Figure 5 - Principe de soudage laser

3.1 Avantages et limitations

Même si le coût d'acquisition des équipements semble beaucoup plus élevé qu'en soudage conventionnel à l'arc, ce n'est pas nécessairement le cas lorsqu'on veut automatiser le soudage. De ce point de vue on peut voir les nombreux avantages que présente le soudage laser :

- La productivité élevée obtenue par la grande vitesse de soudage [23];
- La précision et la finesse du joint réalisé en une seule passe;
- Le soudage à distance et la facilité d'accès aux zones à souder [23, 24];
- L'absence de distorsion;
- La reproductibilité et la qualité;
- Le métal d'apport est généralement non requis;
- Le soudage en temps partagé avec le même faisceau laser;
- Le soudage de formes complexes;
- Les arrêts et départs quasi instantanés;
- La zone affectée thermiquement presque inexistante (quelques centaines de microns);
- Le cycle thermique local et rapide donnant des propriétés mécaniques supérieures et pouvant même atteindre celles du métal de base.

Avec ces avantages combinés, on mentionne pouvoir obtenir des délais d'amortissement variant de 2 à 6 ans [4]. Ce qui motive aussi le choix du soudage laser est l'obtention d'une meilleure qualité du produit

qui répond à une demande interne ou celle de la clientèle. On peut effectuer des assemblages dans une large gamme d'épaisseurs de 0.1 à 5 mm avec un minimum de rebut de production. Le soudage laser ouvre la porte à de nouvelles conceptions impossibles à réaliser par le soudage conventionnel tel que le soudage par transparence (en passant au travers de la pièce du dessus), la réalisation de joints fins esthétiques.

Ce procédé, sans métal d'apport, exige par contre pour sa mise en œuvre une grande précision dans l'accostage des joints (jeu maximal de l'ordre du dixième des épaisseurs à assembler). On peut comprendre cependant que cette exigence fait partie intégrante de la qualité.

Vu l'investissement requis pour implanter cette technologie, on pense à un volume de production élevé et à des applications critiques pour le justifier. Compte tenu des avantages en productivité et en qualité, il est utile de profiter des experts du domaine pour en évaluer le potentiel qui s'étend à tous les métaux.

4. Les alliages d'aluminium

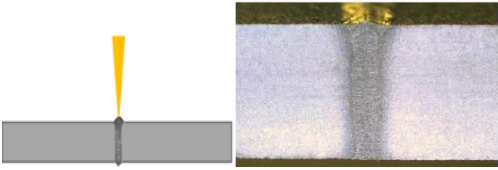
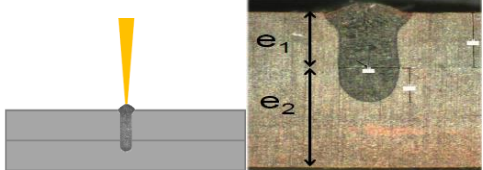
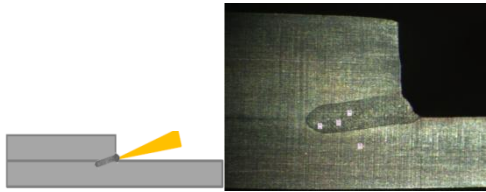
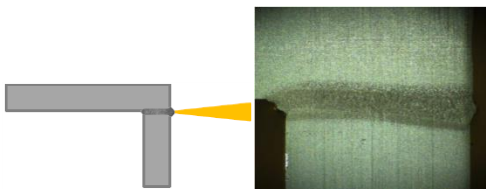
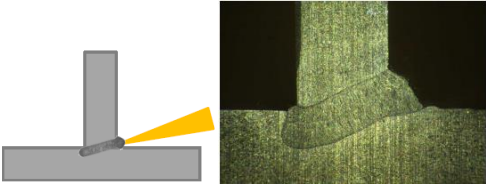
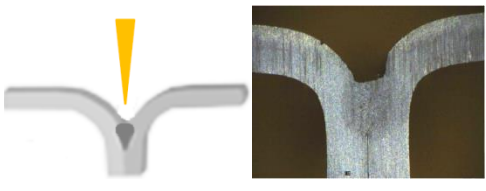
L'aluminium et ses alliages requièrent des sources laser puissantes à cause de la réflectivité élevée vis-à-vis de la lumière des lasers. Grâce à la haute densité d'énergie produite par les sources disponibles aujourd'hui, le soudage laser de l'aluminium est un procédé d'assemblage viable dans l'industrie.

La sensibilité à la fissuration d'un alliage d'aluminium lors de sa solidification est fonction de la composition chimique de l'alliage [5]. Les procédés d'assemblage par fusion sont donc affectés par ce phénomène. Aussi pour les alliages ayant une faible soudabilité on ajoute un alliage d'apport qui vise à corriger ce défaut. Le soudage hybride (GMAW + laser) a été développé et fait l'objet de recherche en vue de pallier la soudabilité de certains alliages avec le laser seul et tirer profit des avantages de la haute densité d'énergie du laser. On arrive à obtenir pour certains alliages des propriétés après soudage comparable au soudage par friction malaxage, mais avec des vitesses de soudage de 5 à 10 fois plus élevées [6]. La technologie hybride permet de souder des plaques épaisses en une seule passe sans préparation.

5. Conception des joints soudés laser

La technologie laser permet toutes les configurations d'assemblage avec une conception de joint similaire aux techniques conventionnelles que ce soit pour le soudage d'angle ou l'assemblage bout à bout. Par ailleurs, la finesse de la zone fondue et l'absence de métal d'apport éliminent le chanfrein et imposent des tolérances d'assemblage plus exigeantes, soit :

- Jeu d'accostage inférieur à 5 % de l'épaisseur en assemblage bout à bout et d'angle;
- Jeu inférieur à 20 % de l'épaisseur en assemblage à recouvrement ou par transparence;
- Jeu inférieur à 10 % de l'épaisseur en soudage bord à bord ou sur bords relevés.

<p style="text-align: center;">Assemblage bout à bout</p> 	<p style="text-align: center;">Assemblage par transparence</p> 
<p style="text-align: center;">Assemblage à recouvrement</p> 	<p style="text-align: center;">Assemblage en L</p> 
<p style="text-align: center;">Assemblage en T</p> 	<p style="text-align: center;">Assemblage à bords relevés</p> 

6. Applications industrielles

La technologie laser devient une technique irremplaçable en soudage et en découpe si on souhaite une précision micrométrique et une grande vitesse d'opération. Le soudage laser est utilisé pour de nombreux matériaux et dans de très nombreux domaines [7, 8] tels que :



- Construction navale : plateforme, structures, yachts;
- Secteur ferroviaire : conteneurs, structures;
- Aéronautique : structure des ailes, panneau du fuselage, réservoir d'essence;
- Domaine spatial : réservoirs cryogéniques, composants moteurs;
- Secteur du transport : roues, suspensions, automobiles et remorques;
- Secteur de la construction : panneaux, châssis, échangeur de chaleur;
- Industrie électrique : interrupteurs, boîte moteur pour moteurs électriques.


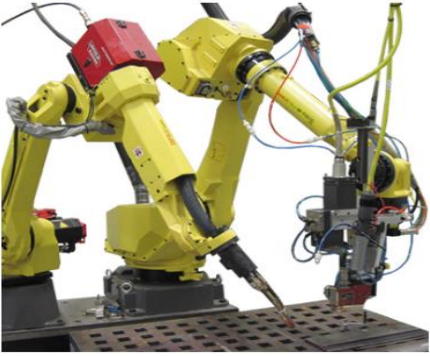

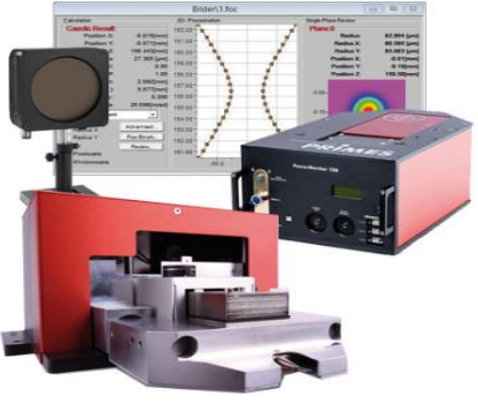
7. Équipements

La mise en œuvre du soudage laser implique l'installation d'un équipement capable de générer et de piloter un faisceau laser puissant sur une ligne de soudage d'épaisseur capillaire. L'utilisation des sources, dont le faisceau peut être transmis par fibre permet le contrôle du faisceau par un robot ce qui rend le procédé facilement adaptable à divers besoins. Les dangers associés au faisceau laser diffèrent des autres procédés en ce sens qu'ils ne sont pas apparents puisque le faisceau et les réflexions ne sont pas visibles. Les opérations de soudage se font donc dans des locaux fermés, conçus pour ce type d'opération, et par des opérateurs familiarisés avec la sécurité laser (ANSI Z136.1).

Le tableau suivant présente quelques équipements pour la technologie de soudage laser.

Tableau : Caractéristiques techniques d'équipements de soudage laser

Caractéristiques	Équipements
<p>Source laser fibre de 15 kW IPG Photonics YLS-15000 [9]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Émission en continu ou modulée jusqu'à 5 kHz • Câbles de fibres optiques disponibles : 150 µm, 200 µm, 400 µm, 600 µm, 1000 µm • Le laser le plus puissant de sa catégorie au Canada • Utilisation : soudage, rechargement, trempe superficielle, découpe 	
<p>Source laser à impulsions ultrarapides Hylase 25 de Fianium [9]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Impulsions de 9 picosecondes (9×10^{-12}s), jusqu'à 150 µJ par impulsion • Fréquence des impulsions de 50 kHz à 20 MHz 	

<ul style="list-style-type: none"> Utilisation : Micro-texturation, perçage, grenailage par laser 	
<p>Scanneur laser RLSK de HighYag [9]</p> <ul style="list-style-type: none"> Enveloppe de travail XY : 200 mm x 300 mm (@ Z=0) Enveloppe de travail en Z : ± 100 mm Vitesse de soudage jusqu'à 1 m/s Vitesse de repositionnement max 5 m/s Utilisation : soudage et découpe à distance 	
<p>Robots Fanuc ArcMate et M710iC [9]</p> <ul style="list-style-type: none"> Soudeuse Lincoln PowerWave 655R Suiveur de joint Servo-Robot Quanta L/F avec plateforme adaptative Utilisation en tandem pour le soudage hybride laser-GMAW 	
<p>Tête de rechargement par laser [9]</p> <ul style="list-style-type: none"> Optiques Precitec Alimentateur à bol vibrant Tekna PF440 	
<p>Équipements de caractérisation du faisceau laser [9]</p> <ul style="list-style-type: none"> Calorimètre Gentec-EO HP100-10KW-HD Calorimètre Primes PowerMonitor100 Analyseur de faisceau Primes FocusMonitor 	

TruLaser Weld 5000 [10]

- ESPACE MAX. DE TRAVAIL : 1600 mm x 800 mm x 700 mm
- CHARGE MAX : 250 kg
- LASERS DISPONIBLES : TruDisk 2000, 3001, 3002, 4001, 4002, 5001, 5002, 6001, 6002, 8001, 8002



Deux des laboratoires laser de Solution Novika

8. Le soudage laser au Québec

Services conseils et formations en soudage laser

SOLUTIONS NOVIKA

129, rue du Parc-de-l'Innovation

La Pocatière (Québec) G0R 1Z0

Tél : 418 856-4350

Courriel : info@novika.ca

Web : <http://www.novika.ca>

Établissement de recherche en soudage laser

Technologies de fabrication en aérospatiale – CNRC

https://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/solutions/installations/ctfa/assemblage_metaux.html

Centre des technologies de l'aluminium – CNRC

Tél. 418 545-5544

Courriel : Stephan.Simard@cnrc-nrc.gc.ca

<https://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/solutions/installations/aluminium.html>

Centre d'optique, photonique et laser – Université Laval

2375, rue de la Terrasse, local 2104

Québec (Québec) G1V 0A6

Téléphone : 418 656-2454

https://www.copl.ulaval.ca/recherche/lasers_et_impulsions_breves/

Entreprises de soudage par laser

Technologie Inovaweld inc.

139, rue du Parc-de-l'Innovation

La Pocatière (Québec) G0R 1Z0

Tél. 418 647-3758, poste 2404

Courriel : m.levesque@inovaweld.com

Web : <http://www.inovaweld.com>

ATELIER SOLUC INC.

3200 rue Watt, local 101-A

Québec (Québec) G1X 4P8

Tél. 418 650-0405

Courriel : info@ateliersoluc.com

Web : <http://www.ateliersoluc.com/>

Dynatherm

4127, rue Cousens

Saint-Laurent, (Québec) H4S 1V6

Tél. 514 636-7800 / 866 460-7739

Web : <http://dynatherm.ca/fr/>

9. Références et liens utiles

- 1- https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser_Nd-YAG
- 2- https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Laser_CO2.png
- 3- ASM Handbook, Vol. 6, Welding, brasing and soldering

- 4- Soudage laser et clinchage des tôles : retours d'expérience, CETIM (2006)
- 5- http://www.bilibs.be/sites/default/files/publicaties/200602_87a10_soudage_innovateur_des_alliages_metalloques_legers.pdf
- 6- http://www.bilibs.be/sites/default/files/publicaties/200604_89a07_soudage_innovateur_des_alliages_daluminium.pdf
- 7- <https://www.rofin.com/en/applications/laser-welding/tube-and-profile-welding/>
- 8- <https://www.rofin.com/en/applications/laser-welding/spot-and-seam-welding/>
- 9- <http://www.novika.ca/laser#equipment>
- 10- https://www.trumpf.com/en_INT/products/machines-systems/laser-welding-systems/trulaser-weld-5000/
- 11- http://www.irepa-laser.com/sites/default/files/_%20soudage/livret_soudage_2008_maj2015.pdf
- 12- http://www.institutmaupertuis.fr/include/telechargement.php?id_doc=139&fichier=1
- 13- <http://www.emag.com/fr/technologies/technologie-du-soudage-laser.html>
- 14- <http://www.novika.ca/home>
- 15- <http://www.institutmaupertuis.fr/fr/technologies/index.php>
- 16- <http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alphafra.html?lang=fra&i=&index=alt&srchtxt=SOUDAGE%20LASER>
- 17- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00692412/document>
- 18- <https://lejournel.cnrs.fr/articles/le-laser-histoire-dune-decouverte-lumineuse>
- 19- https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser_au_dioxyde_de_carbone
- 20- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser>
- 21- <https://www.youtube.com/watch?v=FkyIh0B451A>
- 22- <https://www.youtube.com/watch?v=2Oswmij538Q>
- 23- <https://www.youtube.com/watch?v=ZY2XmKOIdmI>
- 24- <https://www.youtube.com/watch?v=bZnMvr-wD0I>