

Moyens de soudo-brasage laser à haute vitesse, techniques expérimentales et numériques Application à la configuration pavillon aluminium côté de caisse acier

II.1.Introduction

Ce chapitre présente le cas d'étude pavillon/côtés de caisse ainsi que la démarche expérimentale mise en place pour l'étude de la conformité des assemblages. Celle-ci est construite autour d'un moyen d'assemblage laser industriel ainsi que de moyens d'analyse de la composition et de la structuration métallurgique des composés intermétalliques. Une présentation des moyens physiques et numériques mis en œuvre pour l'étude des cycles thermiques obtenus à haute vitesse d'assemblage est finalement effectuée.

II.2.Liaison pavillon/côté de caisse et configuration d'étude

II.2.1. La liaison pavillon/côté de caisse

La production, au sein des usines du groupe Renault, est organisée en 7 étapes majeures, représentées sur la figure II.1, qui se déclinent ainsi :

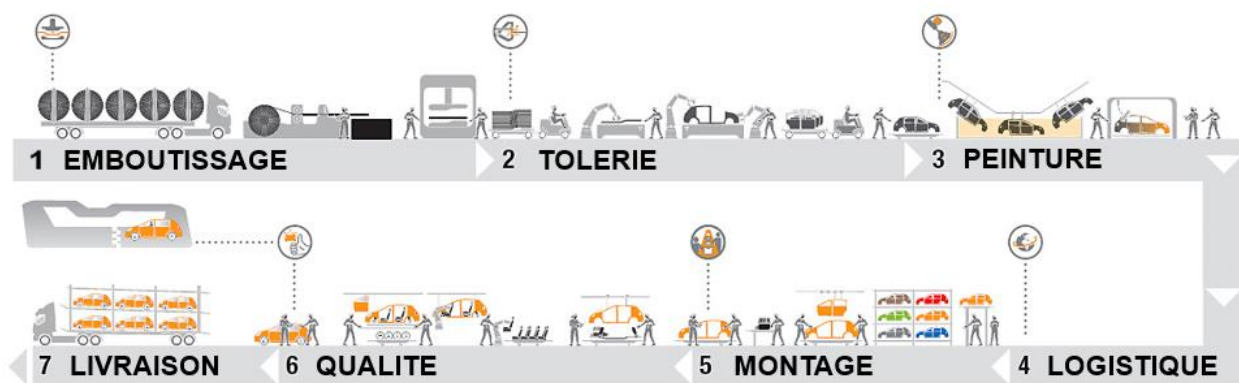


Figure II.1 – Le cycle de production Renault [3].

1. L'**emboutissage** où sont livrées des bobines d'acier et d'aluminium de grandes dimensions. Celles-ci sont découpées et embouties pour préparer les pièces qui formeront l'ossature du véhicule.

2. La **tôlerie** récupère l'ensemble de ces sous éléments et les assemble grâce à plusieurs process industriels tels que le soudage par résistance, soudure électrique sous flux gazeux, type MIG/MAG, ou encore le soudo-brasage laser. A la sortie de la tôlerie les différentes pièces ainsi assemblées forment l'ensemble intitulé « caisse en blanc » du véhicule.
3. La caisse en blanc, en sortie de la tôlerie, est transférée au sein de la **peinture** où elle est protégée de la corrosion par cataphorèse et où les différentes cavités sont remplies de cire ainsi que de mastic pour éviter la stagnation de liquide. L'ensemble est alors peint aux différentes teintes définies pour la gamme en question.
4. La **logistique** transfère alors la caisse peinte vers les prochaines étapes de production du véhicule.
5. Les composants manquants tels que les équipements intérieurs et extérieurs du véhicule ainsi que la base roulante sont rajoutés au département **montage**.
6. Le véhicule fini subit alors un contrôle de la conformité ainsi que d'éventuelles retouches au sein de la **qualité** avant d'être envoyé pour stockage.
7. La dernière étape consiste à la **livraison** chez les clients Renault des véhicules produits.

Ce travail de thèse est plus spécifiquement mené au sein du département « Assemblage caisse et échappement » du technocentre Renault. Celui-ci supporte et fait le lien avec les départements tôlerie des usines. L'assemblage de la caisse au sein des tôleries s'effectue par l'ajout successif des pièces préparées en emboutissage. Le détail de ces différentes opérations est présenté sur la figure II.2 ci-dessous :

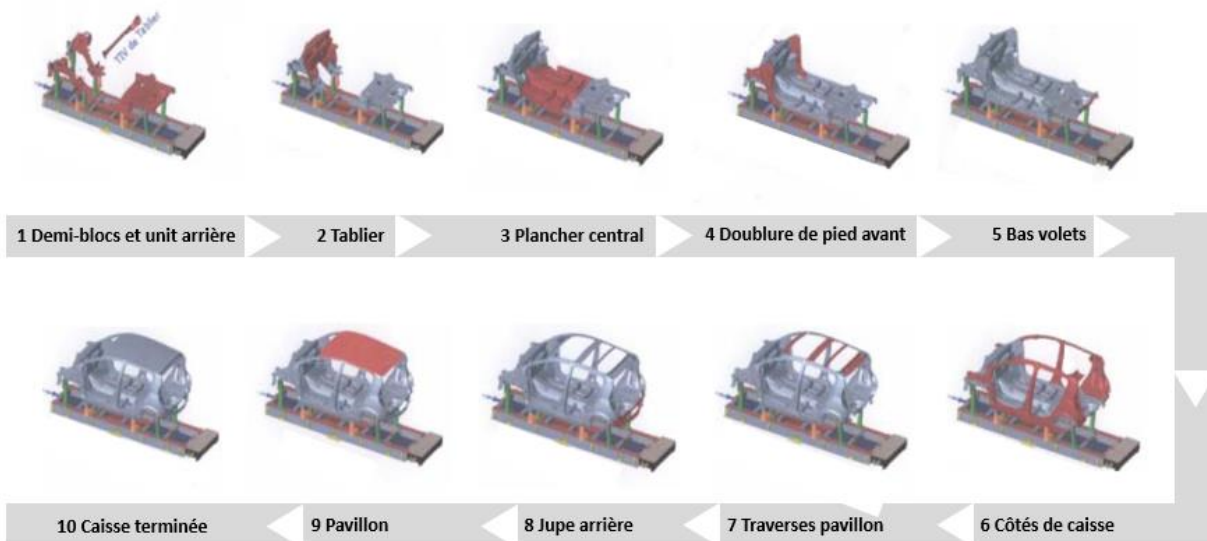


Figure II.2 – Exemple de processus complet d'assemblage progressif d'une caisse [3].

Lors de chacune des étapes de création de la caisse en blanc, un ou plusieurs process d'assemblage sont utilisés. L'étape 9, qui consiste en l'ajout du pavillon nous intéresse tout particulièrement. Après que le pavillon ait été déposé par un robot préhenseur, deux robots équipés de têtes laser le soudo-brasent avec les côtés de caisse gauche et droit. L'ensemble du processus doit être exécuté en

respectant le temps de cycle fixé par la cadence de production de 60 véhicules/heure. Dans cette optique, la vitesse minimale de soudo-brasage nécessaire est de 4m/min. La perspective d'augmentation de la cadence de production nécessite l'étude des vitesses d'assemblage allant jusqu'à 6 m/min.

Le pavillon présente une géométrie spécifique avec un fort galbe qui vient épouser les formes des côtés de caisse gauche et droit. L'ensemble mis en position est visible sur la figure II.3.

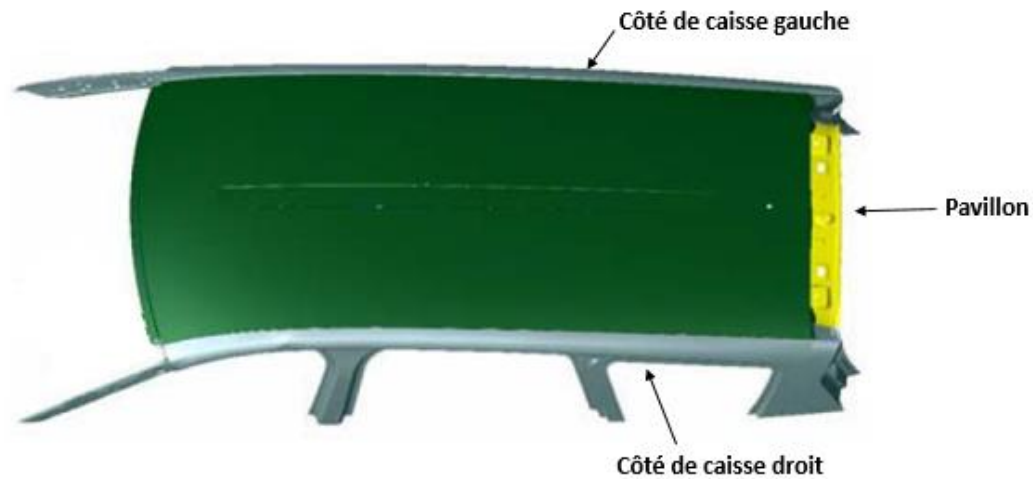


Figure II.3 – Représentation CAO de l'ensemble pavillon/côtés de caisse [3].

Les extrémités des côtés de caisse et du pavillon présentent des courbures permettant la mise en géométrie des pièces lors de l'opération de dépose du pavillon. Les pièces en place sont alors soudo-brasées, avant les opérations de masticage, de cataphorèse et de peinture. Le processus de dépose et d'assemblage est donné sur la figure II.4.

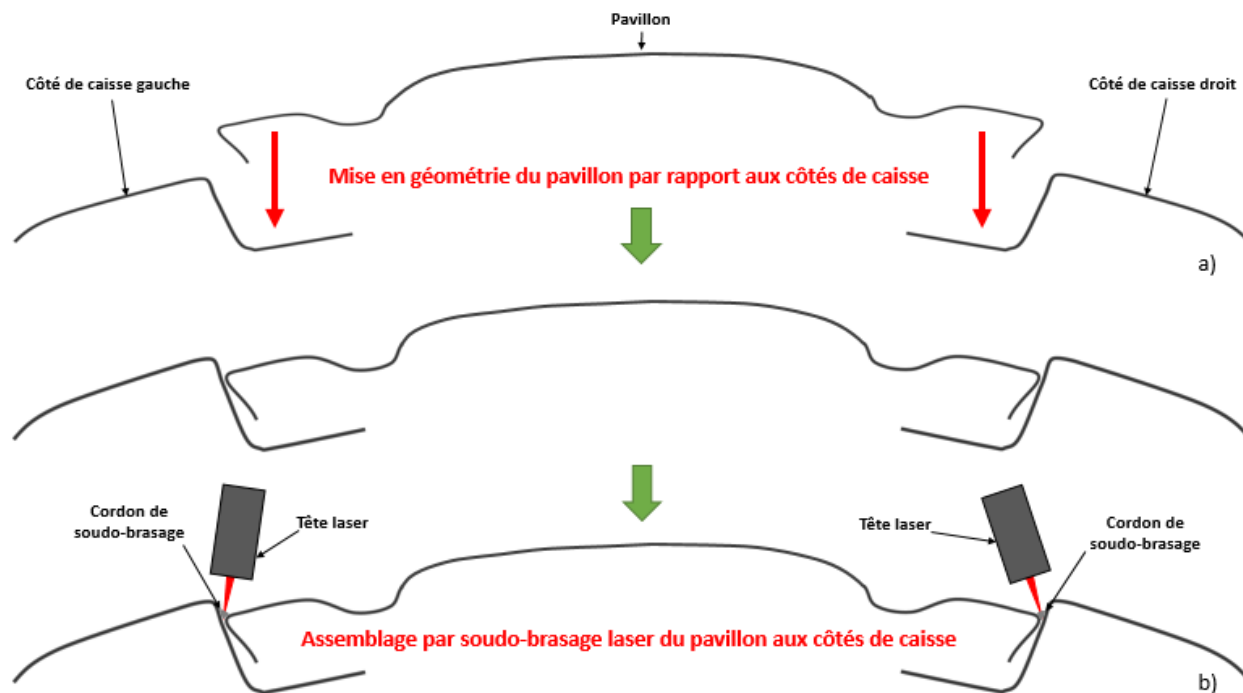


Figure II.4 – Représentation schématique de l'ensemble pavillon/côtés de caisse et des deux étapes principales d'ajout du pavillon : a) mise en géométrie et b) soudo-brasage du pavillon aux côtés de caisse [3].

La figure II.5 représente une coupe macrographique d'une liaison pavillon acier/côté de caisse acier prélevée sur un véhicule.

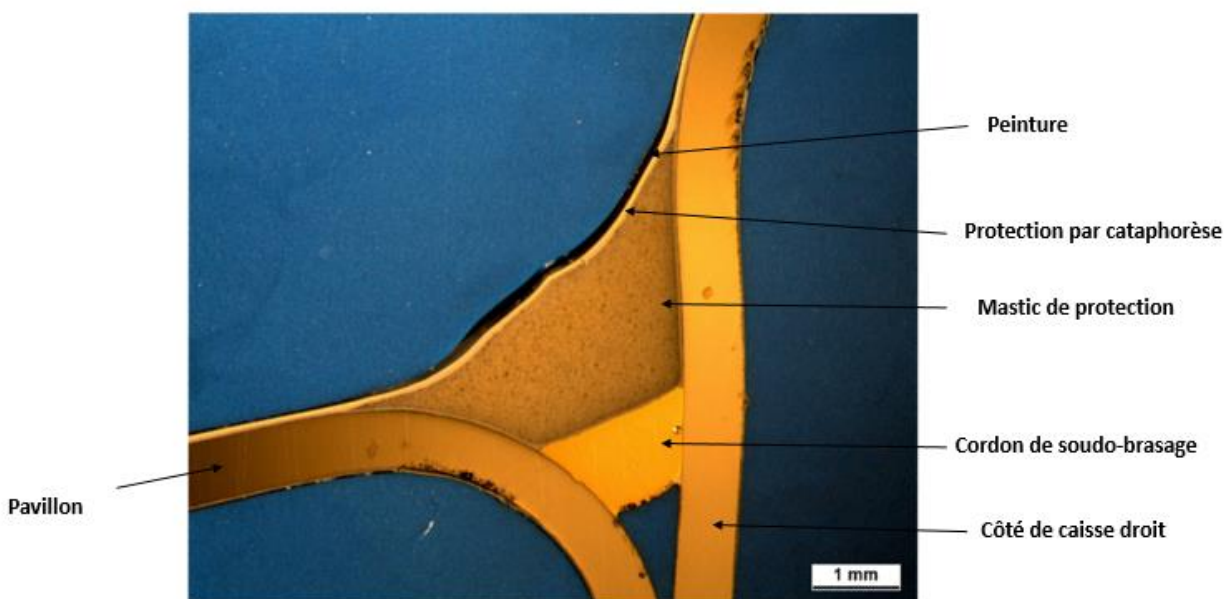


Figure II.5 – Coupe macrographique d'une liaison pavillon acier/côté de caisse acier après peinture [3].

II.2.2. Configuration d'étude pour l'assemblage pavillon aluminium/côté de caisse acier

Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons défini une configuration d'éprouvettes représentative de la liaison pavillon-côté de caisse. Les éprouvettes, de 500 mm de longueur, sont pliées avec les mêmes rayons de courbure que le pavillon et les côtés de caisse assemblés en usine. La seule différence réside dans l'absence de galbe des éprouvettes dont les plans sont représentés sur les figures II.6 et II.7.

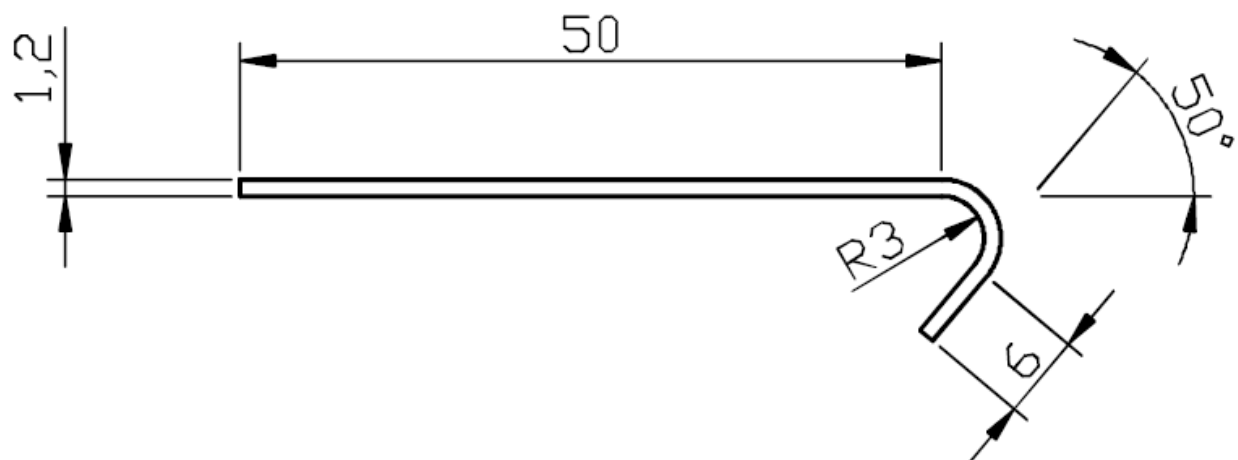


Figure II.6 – Plan de l'éprouvette pavillon aluminium, longueur de la développée = 62,81 (toutes les longueurs sont en mm).

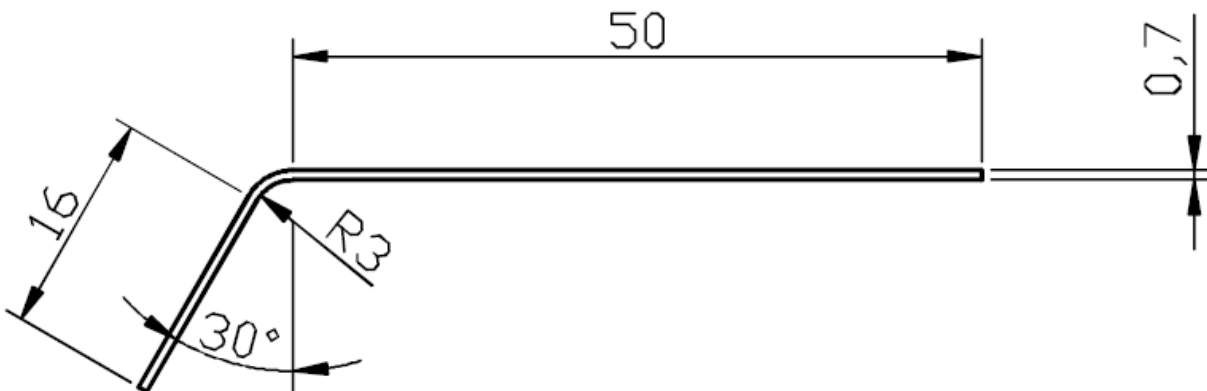


Figure II.7 – Plans de l'éprouvette côté de caisse acier, longueur de la développée = 69,1 (toutes les longueurs sont en mm).

Les tôles sont placées et bridées manuellement dans un support éprouvette, visible sur la figure 8.



Figure II.8 – Photo du support éprouvette.

L'éprouvette aluminium est placée en premier en butée contre le support. Dans un second temps la tôle en acier est mise en place en butée contre la tôle d'aluminium en garantissant un jeu nul entre les deux tôles (figures II.8, II.9 et II.10). La différence de hauteur entre le pavillon et le côté de caisse est reproduite entre les deux tôles grâce à des cales de surélévation. Les figures II.9 et II.10 représentent respectivement la mise en position des tôles permettant de garantir le jeu nul et une vue schématique de l'ensemble tôles et support.

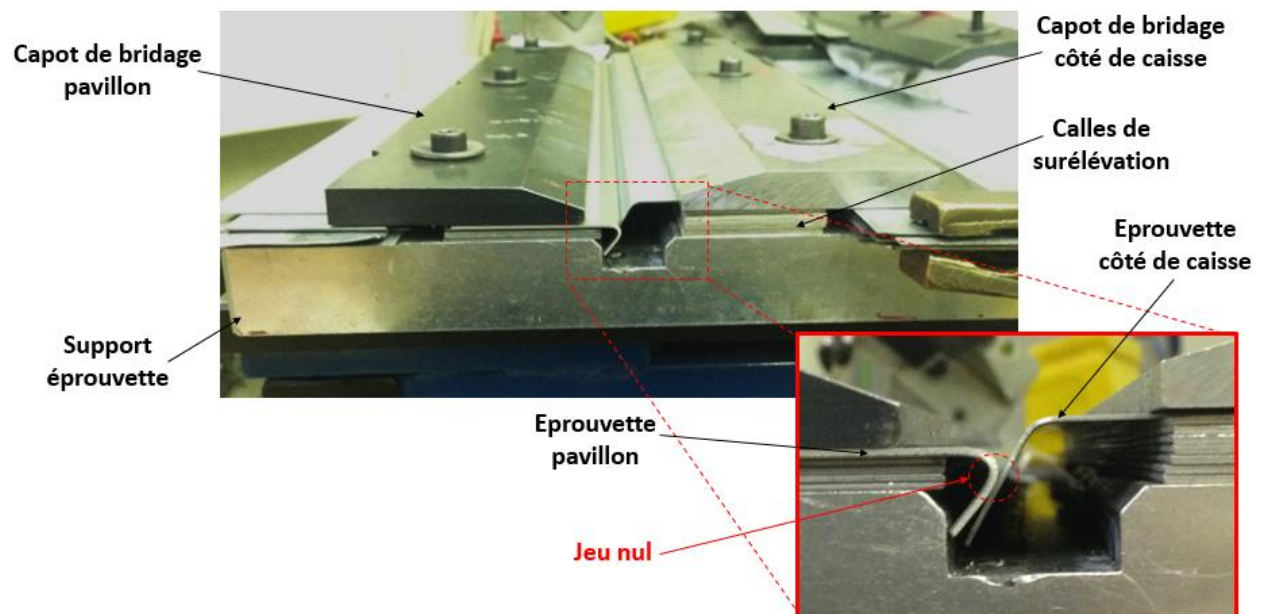


Figure II.9 – Disposition des tôles dans le support éprouvette.

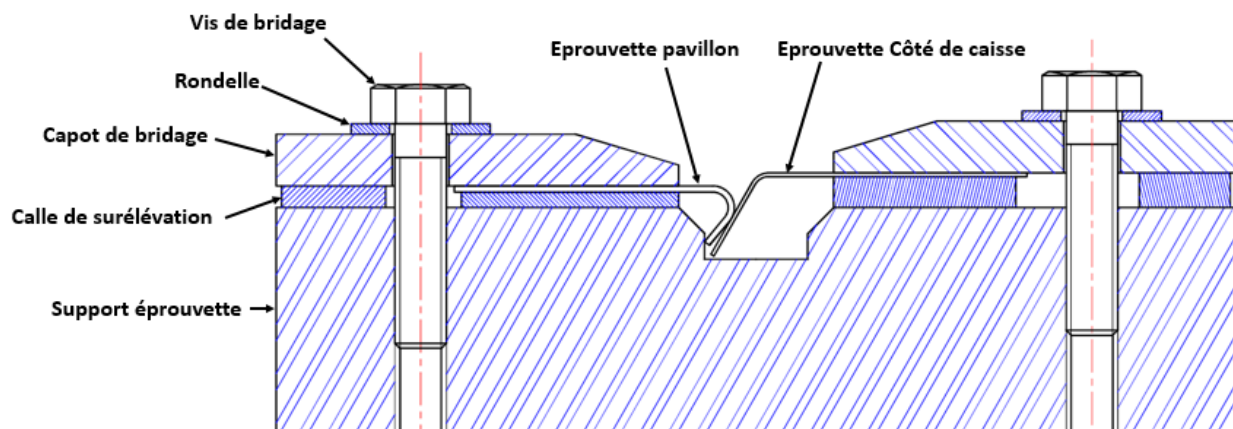


Figure II.10 – Représentation schématique de la section de l'ensemble {support éprouvette, éprouvette pavillon, éprouvette côté de caisse}.

II.3. Matériaux

II.3.1. Métaux de base

Les nuances des deux métaux de base sont fixées pour l'ensemble de l'étude. Elles ont été directement fournies par les usines Renault. L'acier DX56D+Z140M formé à froid et galvanisé à chaud est utilisé pour représenter le côté de caisse. L'épaisseur de la protection de zinc est de 10 μm . Le pavillon aluminium est, quant à lui, issu de la série des 6XXX traité T4. La composition et les propriétés de ces deux nuances sont résumées dans le tableau II.1.

Matériau	Composition chimique (% massique)								Propriétés mécaniques	
	C	Si	Mn	Mg	Fe	Zn	Cu	Al	Re (MPa)	Rm (MPa)
DX56D+Z140M	0.002	0.006	0.105	-	Bal.	-	-	-	120-180	260-350
AA6016-T4	-	1.0-1.5	<0,2	0.25-0.6	<0.5	<0.2	<0.2	Bal.	90-120	245

Tableau II.1 – Composition chimique et propriétés des nuances d'aluminium et d'acier.

Nos essais sont effectués sans utilisation de flux de décapage des couches d'oxydes. Les tôles ont cependant été brièvement frottées avec un morceau de tissu pour enlever les traces restantes des huiles utilisées pour stocker et conserver les tôles en usine.

II.3.2. Métaux d'apport

Le choix des métaux d'apport pour cette étude a été effectué au vu de l'expérience interne de Renault et des éléments issus de la bibliographie. Les nuances de fils majoritairement composées de zinc n'ont pas été considérées, principalement à cause des problèmes de fissuration à froids

soulevés par Mathieu (2005) et Pena (2005) [14-18], au profit des nuances de la famille Al – Si : $AlSi_5$ (ER4043), $AlSi_{12}$ (ER4047) et $AlSi_3Mn1$ (ER4020). Cette famille présente un intérêt fort pour l'assemblage acier/aluminium de par l'influence du silicium sur la formation des intermétalliques présentée précédemment. Les compositions chimiques et les températures de fusion de ces trois nuances sont présentées dans le tableau II.2.

Matériau	Composition chimique (% massique)										Température de fusion (°C)
	Al	Mn	Si	Cu	Zn	Fe	Mg	Ti	Be	Autre	
$AlSi_5$	Base	<0,5	4,5-5,5	<0,5	<0,1	<0,4	<0,5	<0,15	<0,0006	<0,15	573-625
$AlSi_{12}$	Base	<0,15	11-13	<0,3	<0,2	<0,6	<0,1	<0,15	<0,0006	<0,15	573-585
$AlSi_3Mn1$	Base	0,8-1,2	2,5-3,5	<0,03	-	<0,2	<0,01	<0,005	-	-	575-579

Tableau II.2 – Composition chimique et température de fusion des métaux d'apports.

Ces nuances de fils ont été acquises sous forme de bobines en diamètre 1,6 mm.

II.3.3. Nuance du gaz de protection

Au travers de cette étude trois nuances de gaz sont utilisées : 100% argon, 100% hélium et 100% azote. L'influence du débit de la protection gazeuse est également étudiée.

II.4. Techniques et conditions expérimentales

II.4.1. Moyen de soudo-brasage

Nos essais sont menés au sein du technocentre Renault (TCR) qui possède plusieurs installations d'assemblage laser alimentées par une source laser à diodes de 6 kW du fabricant Laserline. Cette source combine trois longueurs d'ondes : 940, 980 et 1060 nm. Comme dans les usines Renault, un ensemble de sécurités sont prévues pour protéger les opérateurs des lasers classe 4. Notamment la disposition de cabines étanches englobant totalement les ilots de travail et empêchant des réflexions inattendues du faisceau laser. Chaque ilot est complètement robotisé et automatisé permettant des manipulations et le lancement des cycles d'assemblage depuis l'extérieur des cabines. Une vue extérieure de la cabine du technocentre Renault est visible sur la figure II.11.



Figure II.11 – Vue extérieure de la cabine laser du technocentre Renault.

Les ilots de soudo-brasage sont des copies des installations usines. Ils sont construits autour d'un robot 6 axes 6006 de la marque ABB, monté sur un axe 0. L'axe 0 autorise des translations du robot sur plusieurs mètres, il permet notamment l'assemblage de pièces avec de fortes variations de géométrie et de grandes dimensions comme le pavillon. Le robot est équipé d'une tête laser ALO3 de la marque Scansonic. Cette tête laser est reliée à la source laser à diodes par une fibre optique de diamètre 1000 μm . Elle possède plusieurs optiques avec un renvoi d'angle permettant la focalisation en sortie du faisceau laser ainsi qu'une caméra permettant de visualiser la position du fil sur un écran déporté (fixé sur le robot). Elle comprend également un cross-jet en sortie de la tête laser, qui consiste en un flux d'air visant à éviter la remontée d'éventuelle projections de matière sur le dernier optique. Cet outil, monté à l'extrémité du robot, est relié à une source de refroidissement à eau qui refroidit également la source laser. Une représentation schématique de la tête laser est fournie sur la figure II.12.

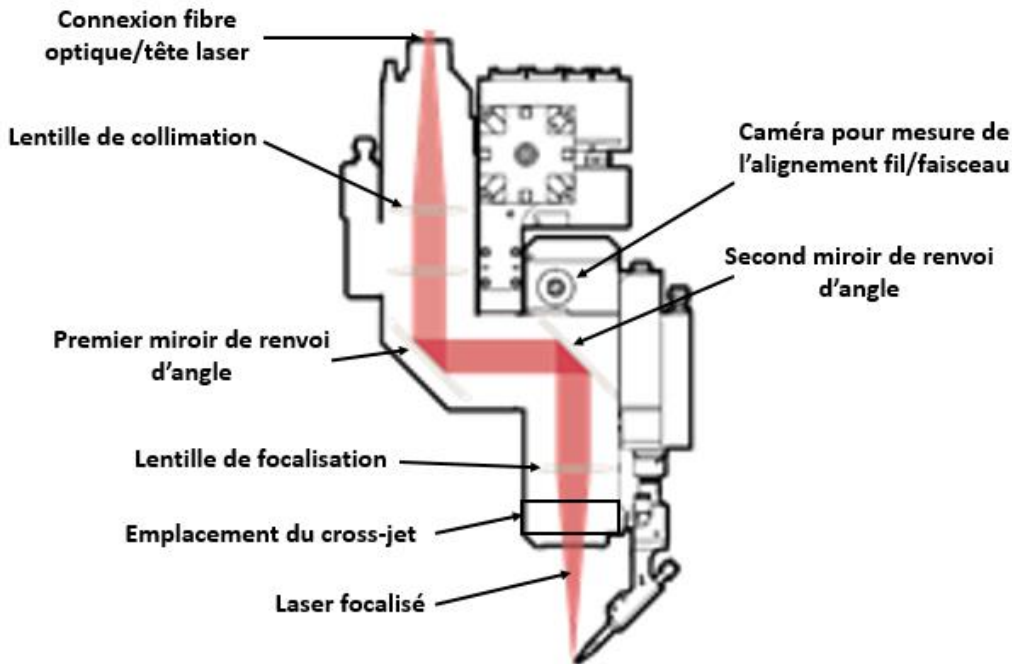


Figure II.12 – Représentation schématique de la tête laser et de ses composants [50].

L'ensemble de la chaîne d'accastillage, comprenant notamment les différents câbles reliés à la tête laser, est fixé sur le squelette du robot et est prévu pour permettre au robot de bouger dans l'ensemble des directions sans endommager les connectiques. En complément, il est possible de se connecter avec un ordinateur sur la tête laser par un câble Ethernet pour régler la distance focale, permettant ainsi de régler la taille du spot laser, les équilibrages de la tête ainsi que l'alignement entre le spot laser et le fil d'apport. La chaîne d'accastillage comprend également l'ensemble du circuit de dévidage du fil d'apport ainsi que la transmission du gaz de protection. Le circuit de dévidage relie la bobine d'apport à la torche fixée sur la tête laser. Elle comprend notamment deux dévidoirs, maître et esclave, dont la mission est d'entraîner le fil ainsi qu'un dispositif de préchauffage du fil par effet joule, l'ensemble étant de la marque Fronuis. Ce dispositif a pour mission de fournir une petite quantité d'énergie au fil, avant qu'il ne soit fondu dans le bain, pour faciliter son passage à l'état liquide. Le gaz de protection est quant à lui déversé sur la zone de soudo-brasage par l'intermédiaire d'une buse fixée sur la tête laser. Le débitmètre de contrôle étant fixé en amont de la buse à hauteur de la tête laser. Le support éprouvette est fixé au sol à l'extrémité de l'axe 0. Des vues de l'installation sont présentées sur les figures II.13, II.14 et II.15.

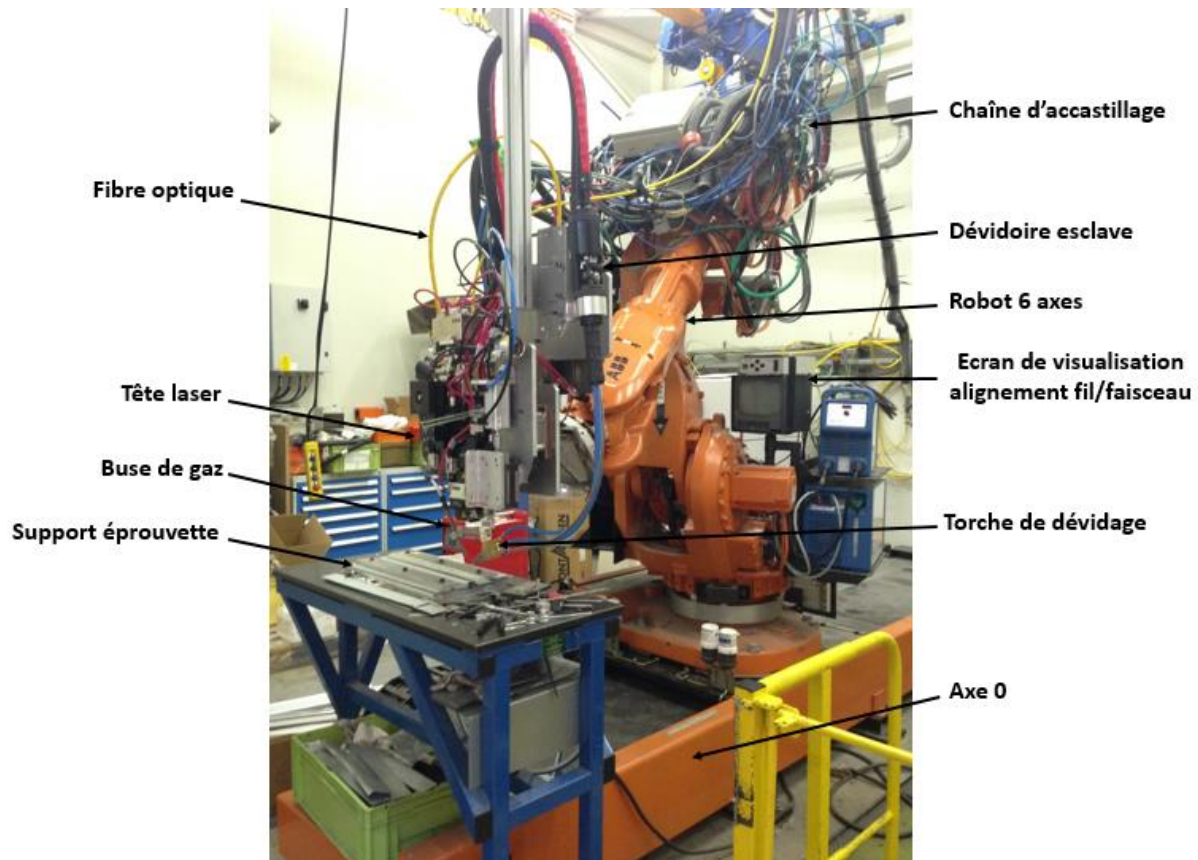


Figure II.13 – Vue de face du moyen robotisé et du support éprouvette.

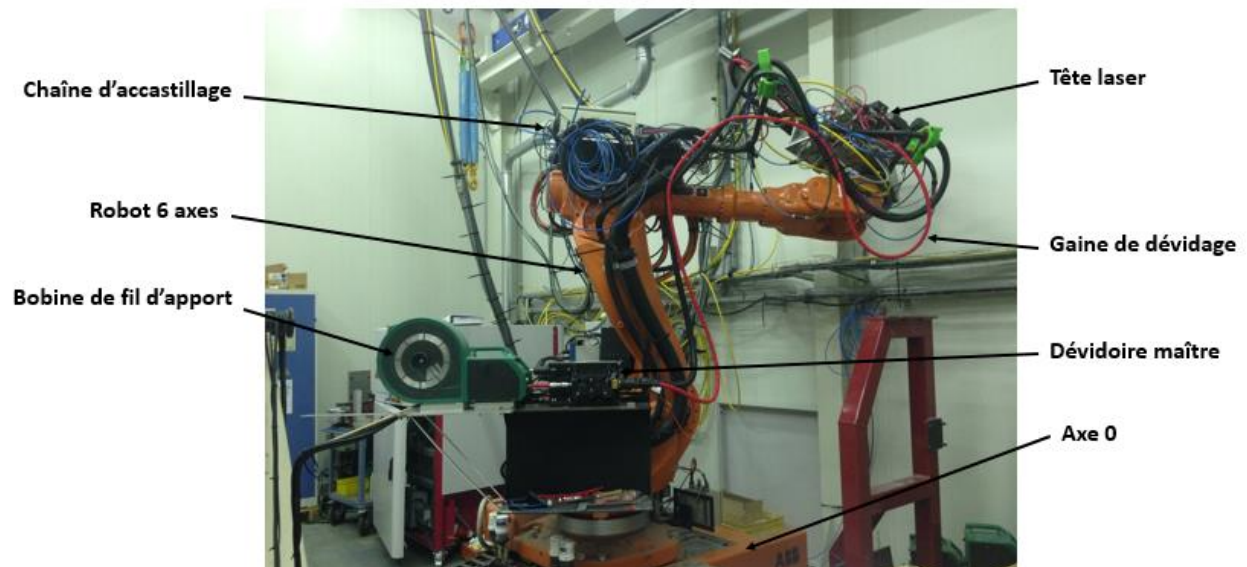


Figure II.14 – Vue latérale du moyen robotisé.

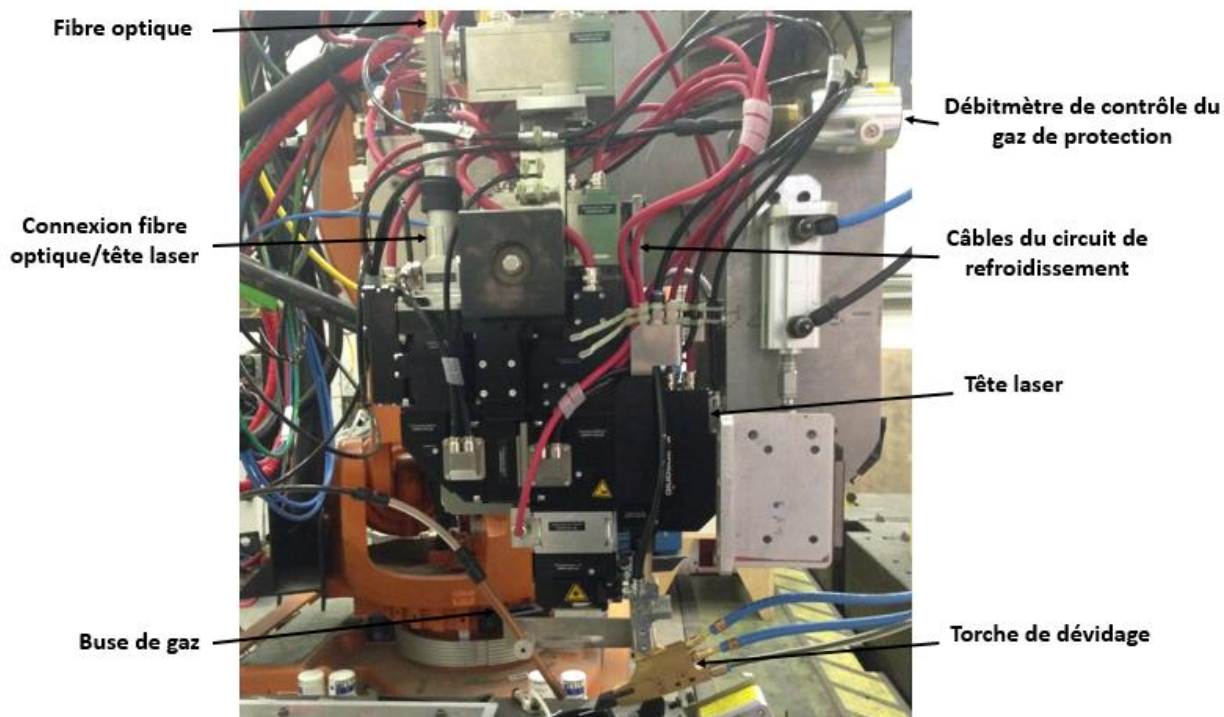


Figure II.15 – Vue détaillée de la tête laser.

L'opération de soudo-brasage d'une éprouvette est complètement automatisée. L'opérateur lance le début du cycle depuis le pupitre de la cabine après avoir vérifié et rempli l'ensemble des conditions de sécurité. Le cycle se décompose en deux trajectoires d'approche, une trajectoire de soudo-brasage et une trajectoire de retour à la position de rebouclage du robot. Ces étapes sont pilotées via une routine par la baie du robot S4C+ automotive de la marque ABB. Au sein de la routine sont réglés les paramètres process suivants :

- Vitesse robot en mm/s.
- Vitesse de dévidage du fil en m/min.
- Intensité courant fil chaud en ampère.
- Le débit du gaz de protection en L/min.

La puissance laser, quant-à-elle, est directement réglée sur la source laser et ne peut excéder les 6kW. La routine pilote les quatre trajectoires ainsi que l'ensemble des sous-étapes de l'opération de soudo-brasage tels que : le démarrage et l'extinction du laser, l'ouverture et la fermeture de l'arrivée du gaz d'apport, le dévidage du fil d'apport ainsi que l'activation et l'arrêt du courant fil chaud. Les trajectoires robot sont créées manuellement au sein de la routine par l'opérateur laser et prennent en compte les spécificités géométriques de l'ensemble composé de la tête laser et de la torche.

II.4.2. Paramètres process de l'installation de soudo-brasage laser

Le tableau II.3 liste l'ensemble des paramètres process propre à l'installation laser :

Paramètre process	Unité	Plage de variation	Détail
Puissance	W (Watt)	[3000;5000]	Laser à diodes Laserline
Courant fil chaud	A (Ampère)	{0,150}	Source fil chaud Fronuis
Nuance fil	% massique	{AlSi ₁₂ , AlSi ₅ , AlSi ₃ Mn ₁ }	-
Vitesse fil	m/min	[4,5;6,5]	Dévidoire Fronuis
Vitesse robot	m/min	[4;6]	Robot ABB
Nuance gaz	Élément chimique	{100% Ar, 100% He, 100% N}	Bouteille air liquide
Alignement fil/faisceau	mm	[-1;+1]	Tête laser ALO3 Scansonic
Débit gaz	L/min	[5;20]	-
Distance focale	1/10 mm	-60	Tête laser ALO3 Scansonic
Position buse de gaz	-	-	
Angle torche de dévidage	° (Degré)	15	Torche Fronuis

Tableau II.3 – Liste des paramètres process de l'installation laser.

L'angle de la torche de dévidage, la distance focale et le positionnement de la tête laser dans l'espace sont conservés constants pour l'ensemble de notre étude.

La torche de dévidage forme un angle de 15° par rapport à l'horizontale. Ce réglage choisi arbitrairement a pour but de faciliter l'apport de matière. La tête laser, quant à elle, est décalée de 5° vers l'éprouvette d'aluminium et de 5° dans la direction de soudo-brasage. Ces deux réglages sont nécessaires pour éviter un endommagement des optiques de la tête par remontée du faisceau laser. La figure II.16 représente ces trois positionnements.

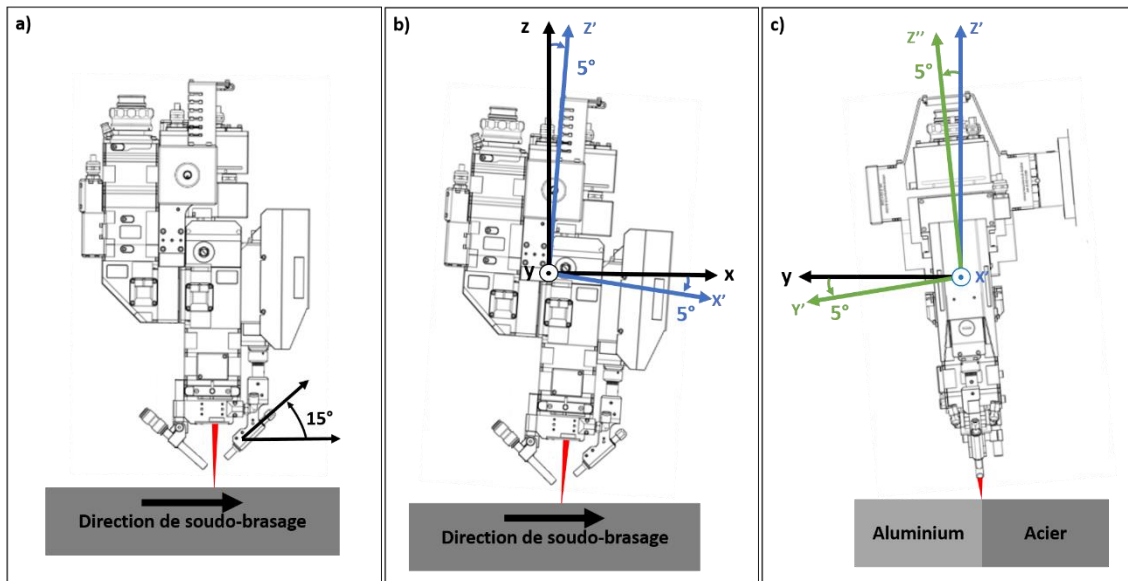


Figure II.16 – Réglage d'un angle de 15° entre la torche d'amenée de matière et l'horizontal a), de 5° de la tête laser dans la direction de soudo-brasage b) et de 5° de la tête laser vers la tôle d'aluminium [50].

La distance focale est réglée au sein de la tête laser. Elle varie par translation de la lentille de focalisation entrainant la formation d'un spot rond par défocalisation du laser. La translation de la lentille tend à faire varier la taille du spot comme présenté sur la figure II.17.

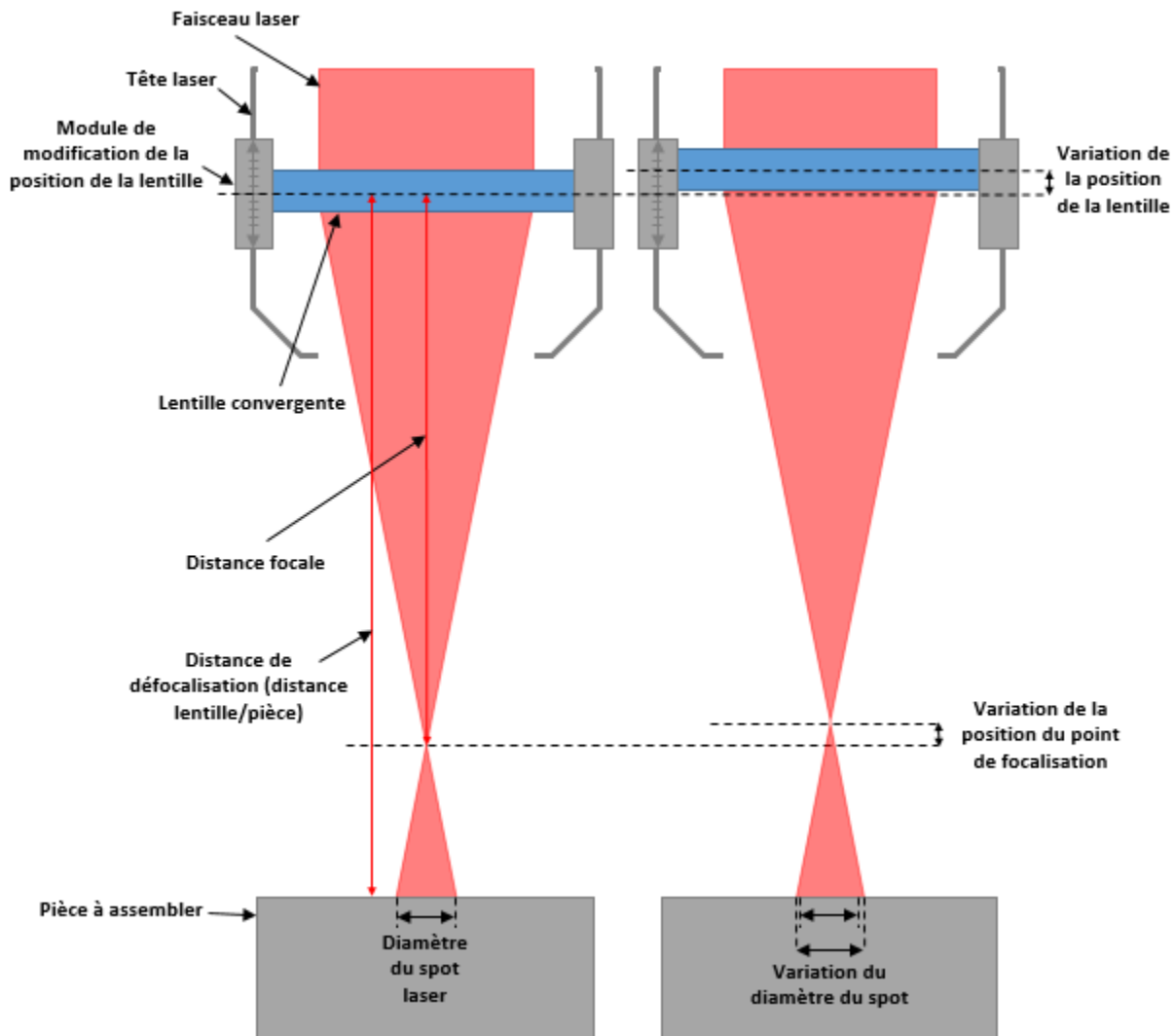


Figure II.17 – Variation du diamètre du spot laser par translation de la lentille de focalisation.

Dans notre cas, la distance focale est réglée pour obtenir un spot de diamètre 3mm. Cette taille de spot représente le bon compromis permettant de couvrir les métaux de base et le fil d'apport. Il est possible de chercher à réduire la distance de défocalisation pour augmenter la concentration de la puissance sur le fil d'apport, cependant cela peut engendrer dans certains cas l'apparition de défauts de soudo-brasage. En complément, la répartition de puissance peut être modulée grâce à l'alignement fil faisceau. Ce paramètre process réglable via la tête laser permet de décaler le spot laser sur un des deux métaux de base, lui apportant ainsi plus de puissance qu'à l'autre métal de base. La figure II.18 représente le réglage de ce paramètre.

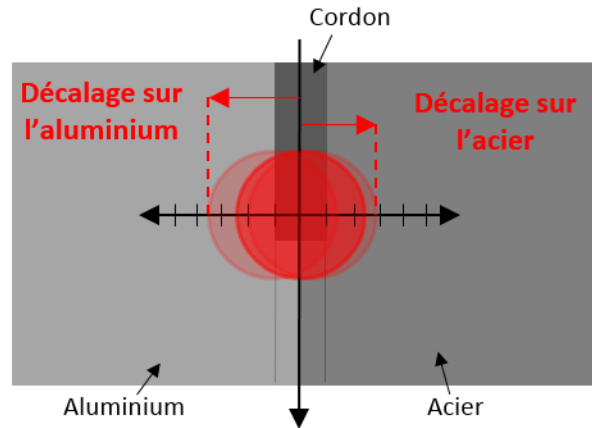


Figure II.18 – Décalage de la position du spot laser sur un des deux métaux de base grâce au module d’alignement fil/faisceau de la tête laser, chaque graduation vaut 1/10 mm.

La position de la buse de gaz a un rôle primordial dans la protection du bain. Celle-ci peut être réglée par deux opérations de translation et une opération de rotation, présentées sur la figure II.19 :

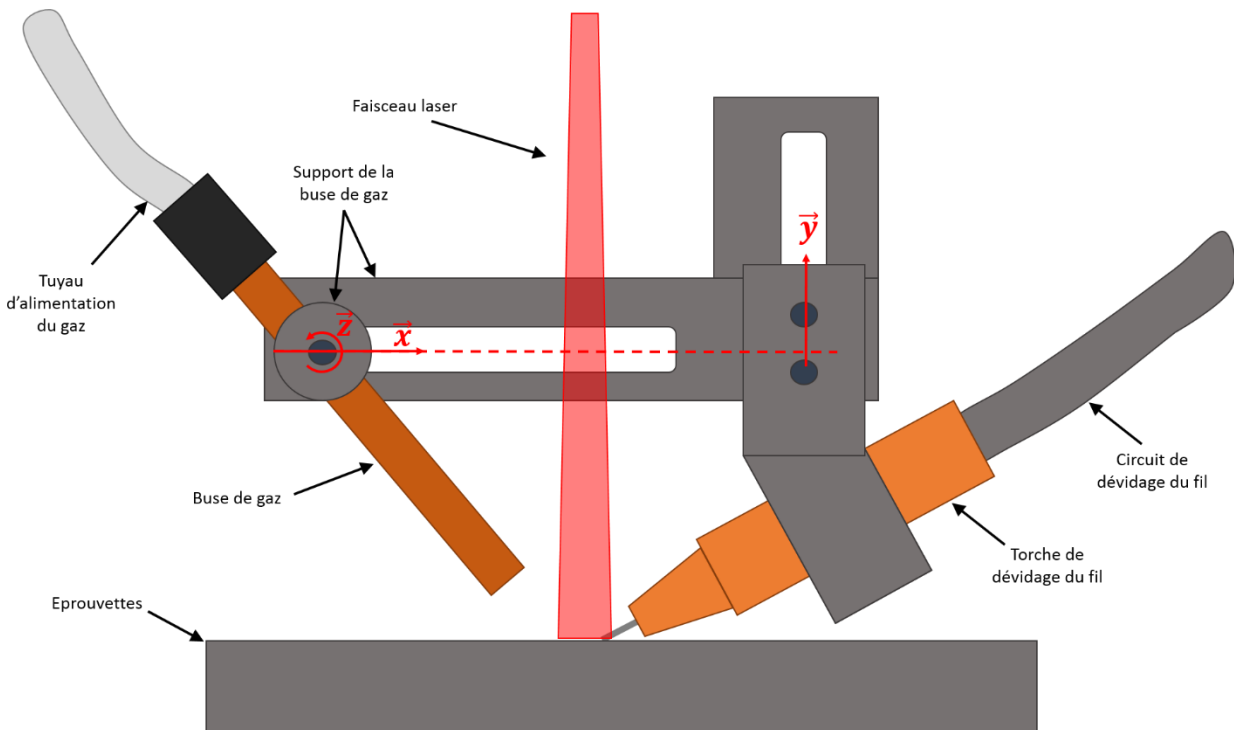


Figure II.19 – Réglage de la position de la buse de gaz par translation selon $\vec{x}$ et $\vec{y}$ ainsi que par rotation autour de $\vec{z}$.

II.4.3. Caractérisation des assemblages

Une fois l'éprouvette soudo-brasée, celle-ci est retirée manuellement du support éprouvette avant d'être caractérisée. Pour chaque configuration process, 5 éprouvettes sont produites et analysées. La figure II.20 présente une éprouvette après l'opération de soudo-brasage.

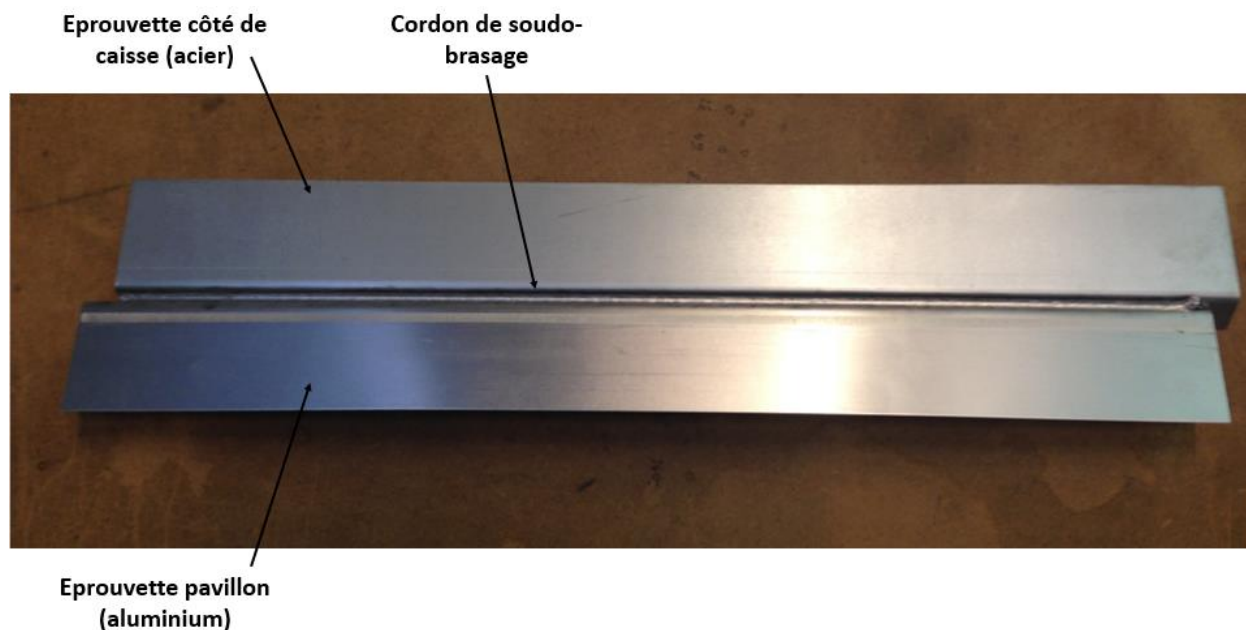


Figure II.20 – Epreuve soudo-brasée.

Chaque éprouvette soudo-brasée subie une caractérisation de ses propriétés mécaniques ainsi qu'une analyse de sa métallurgie en début, milieu et fin de cordon. Six échantillons sont préparés par des opérations de découpe : trois échantillons de longueur 38 mm pour essais mécaniques et trois de longueur 10 mm pour la réalisation de coupes macrographiques (figure II.21).

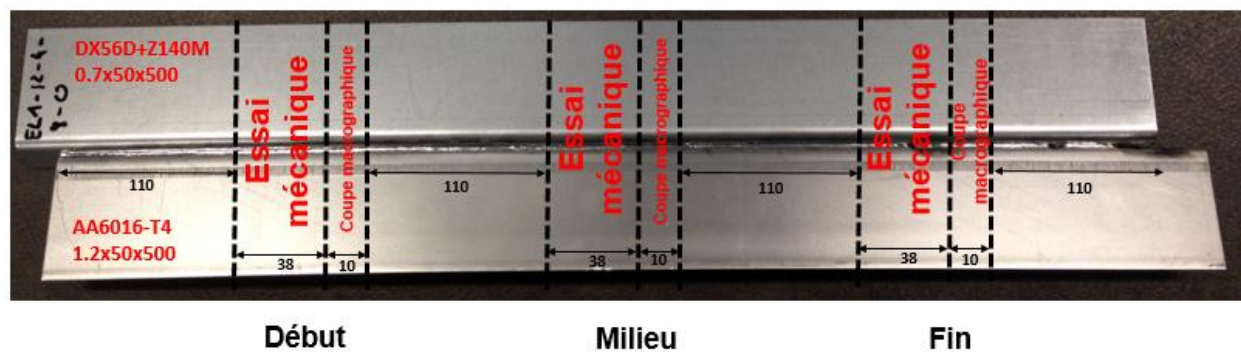


Figure II.21 – Zones d'études et de découpes des éprouvettes.

La résistance des assemblages en début, milieu et fin de cordon a été évaluée par un essai en traction-cisaillement réalisé grâce à une machine d'essais en traction EZ 50 de Lloyd Instruments (50kN) avec une vitesse de 20 mm/min. Lors de cet essai, un effort uni-axial est appliqué sur les extrémités en acier et en aluminium des échantillons. La figure II.22 représente la géométrie des éprouvettes de traction.

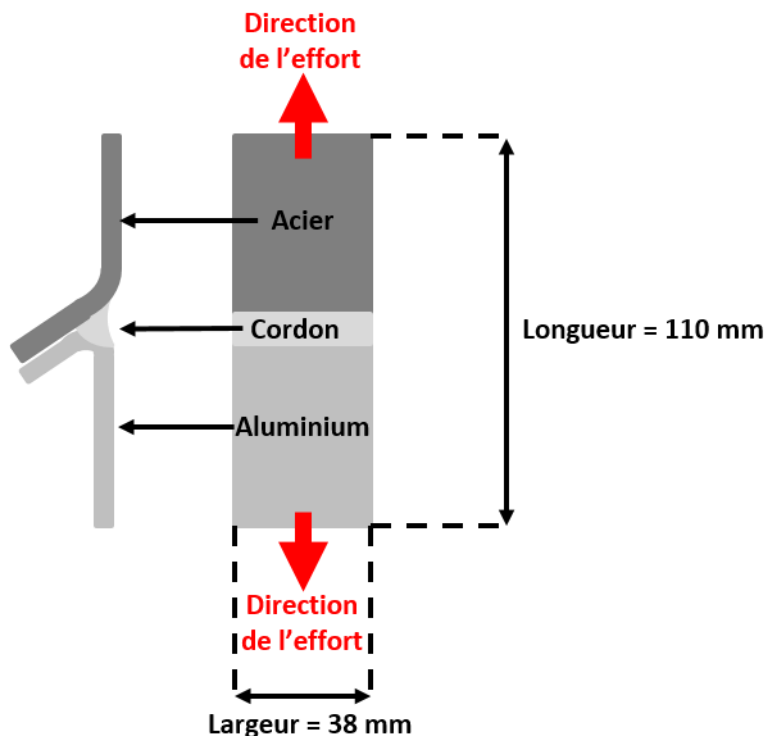


Figure II.22 – Section et dimensions des éprouvettes de traction.

Pour chaque essai, la zone de rupture a été identifiée et classifiée. La présence de défauts de soudo-brasage dans le cordon est également quantifiée pour les 5 éprouvettes de chaque configuration.

Les coupes macrographiques ont été obtenues par enrobage dans des résines phénoplaste et diallylphtalate suivi d'un pré-polissage avec du papier abrasif (320, 800 et 1200 grains/cm²) puis finalement de trois polissages successifs (6, 3 et 1 µm). Les échantillons ainsi préparés ont permis la mesure des surfaces d'interactions, de l'épaisseur des cordons et de la largeur de la zone soudée par microscopie optique (microscope Nikon Epiphot 200).

Les épaisseurs de la couche de composés intermétalliques ont également été observées et mesurées par microscopie optique. Comme démontré par Vrenken et al. [28] ainsi que par G-L. Qin et al. [21], dans le cadre du process de soudo-brasage, la couche de composés intermétalliques peut être divisée en trois zones de géométries différentes, tel que visible sur la figure II.23.

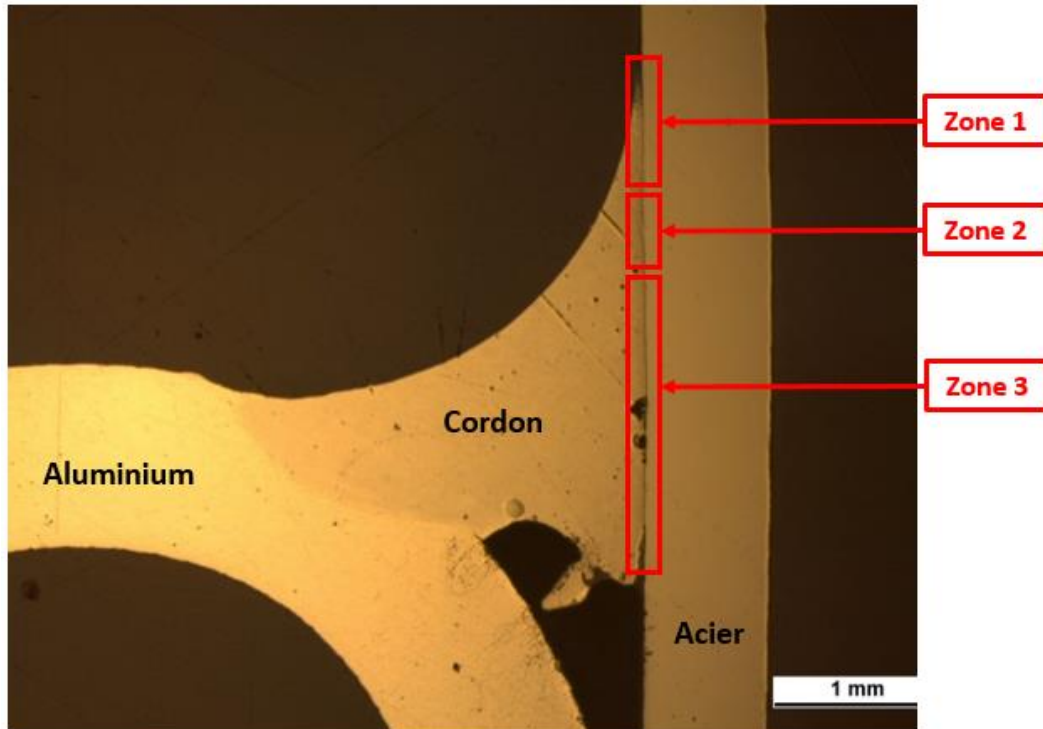


Figure II.23 – Décomposition de la surface d’interaction cordon/acier en trois zones.

Dans la zone 1, la couche d’intermétalliques s’initie à partir de la surface du cordon et son épaisseur croît pour atteindre un maximum dans la zone 2, formant localement une « surépaisseur » de la couche d’intermétalliques. Dans la zone 3, l’épaisseur de la couche diminue jusqu’à ne plus être distinguable en pied de cordon. L’épaisseur maximale de la couche de composés intermétalliques, obtenue en zone 2, a été mesurée et enregistrée pour chaque échantillon. Un exemple de mesure est présenté sur la figure II.24.

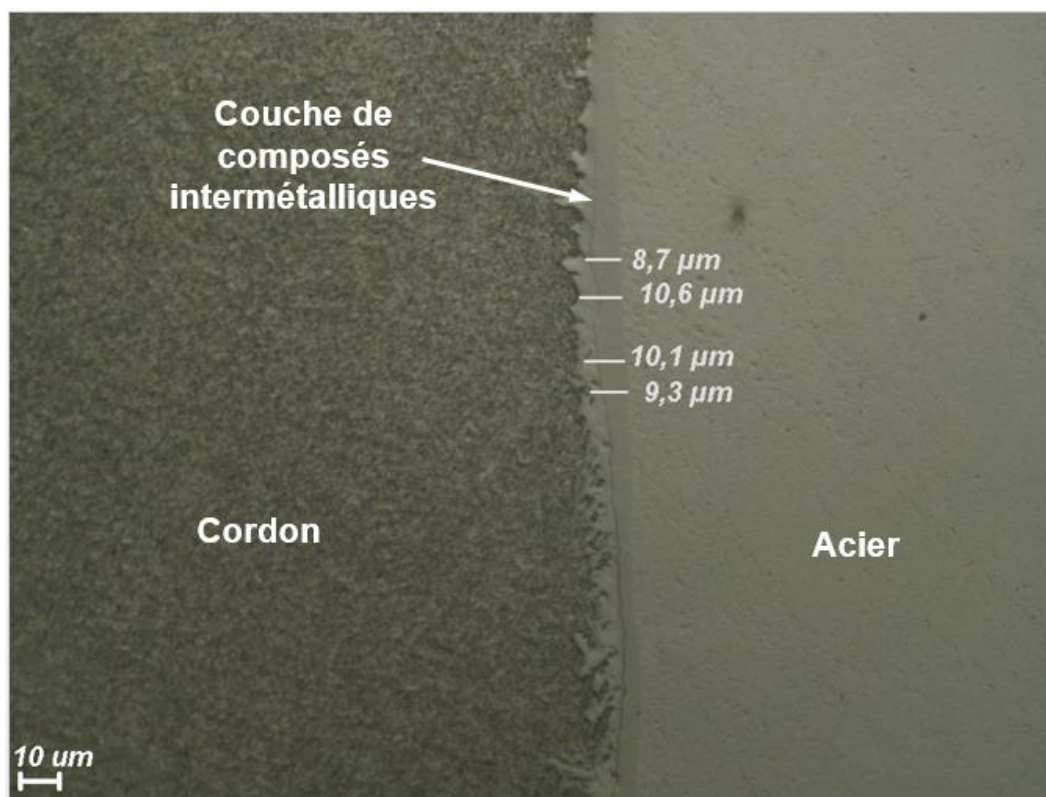


Figure II.24 – Exemple de mesure de l'épaisseur maximale de la couche de composés intermétalliques par microscopie optique.

La dureté de la couche d'intermétalliques a été mesurée en réalisant des essais Vickers grâce à une machine de micro-dureté LEICAVHMT et un récepteur à transferts de charge (CCD) SONY. Lors de ces essais, une pointe pyramidale déforme localement la matière créant une empreinte dont les dimensions permettent de déterminer la dureté du matériau.

Une analyse dispersive en énergie (Energy Dispersive Spectroscopy-EDS) a été menée au centre ENSAM de Châlons-en-Champagne avec un microscope électronique à balayage conventionnel JEOL JSM6400 pour obtenir la composition chimique de la couche. L'évolution de la composition sur une ligne partant de l'acier et se finissant dans le cordon a été obtenue ainsi qu'une cartographie des éléments chimiques sur une zone d'étude centrée sur la couche de réaction. Elle a été complétée par une analyse EBSD (Electron Backscattered Diffraction) réalisée au centre de l'ENSAM d'Aix-en-Provence avec un microscope électronique à balayage JEOL 7001F LV. Celle-ci permet d'obtenir la microstructure de la couche et notamment la taille des grains ainsi que la structure cristallographique des composés intermétalliques. L'EBSD permet également l'obtention des cartographies des angles d'Euler, $(\varphi_1, \phi, \varphi_2)$ permettant de déterminer l'orientation du référentiel (X', Y', Z') du cristal dans le référentiel (X, Y, Z) du matériau. La figure II.25 représente un exemple d'orientation d'un cristal cubique avec les angles d'Euler avec la convention de Bunge.

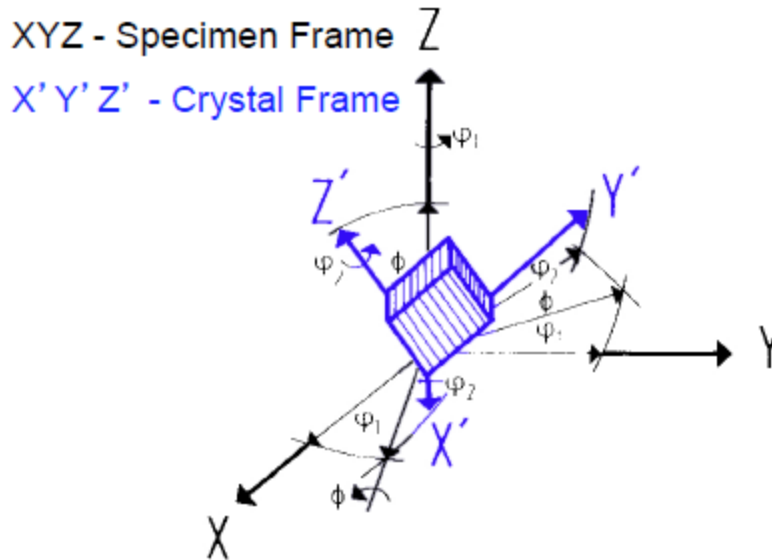


Figure II.25 – Représentation de l'orientation d'un cristal cubique grâce aux angles d'Euler.

Les figures de pôles, également obtenues par l'analyse EBSD, permettent de représenter de manière différente l'orientation du cristal. Elles consistent en la projection stéréographique sur le plan équatorial des pôles étant obtenus par intersection de la perpendiculaire au plan $\{hkl\}$ du cristal avec la sphère de projection. La figure II.26 représente un exemple de projection.

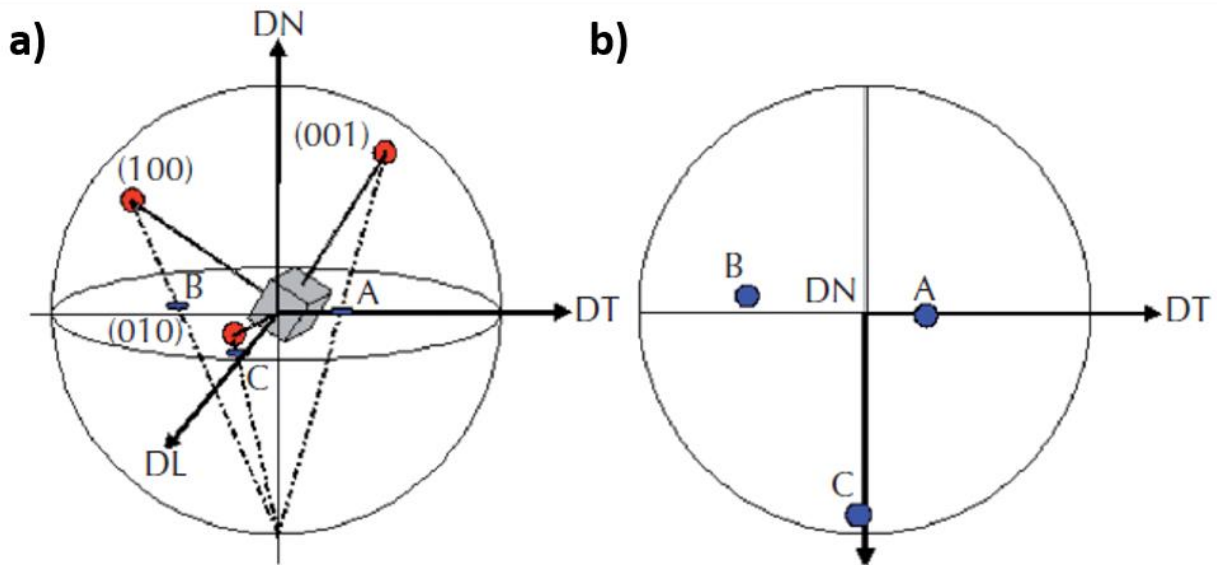


Figure II.26 – Exemple de projections stéréographiques sur le plan équatorial des pôles $\{hkl\}$ d'un cristal cubique a) et de la figure de pôles obtenue b).

Les analyses EDS et EBSD ont été conduites avec une énergie constante de 15keV.

II.4.4. Etude du cycle thermique

II.4.4.1. Mesures par thermocouple

La température à l'interface acier/aluminium fut enregistrée et analysée par l'utilisation de thermocouples à gaine métallique semi-rigide de type K, dont les caractéristiques sont listées ci-dessous :

- Diamètre=1 mm
- Métaux de gaine : Inconel 600
- Température maxi : 1100°

La fiche technique du thermocouple type K annonce que 63% de la température mesurée est atteinte au bout de 0,15 secondes. Après plusieurs essais à des plages de 5, 10, 15, 25 et 90°, il s'avère que 100% de la température mesurée est réellement atteinte au bout de 2 secondes.

Pour notre étude, nous avons procédé à des mesures sur la face extérieure de l'acier ainsi que dans le bain de fusion, au plus proche de la face intérieure de l'acier. Dans les deux cas, les thermocouples sont fixés grâce à un scotch en aluminium, permettant de garantir la position du thermocouple pendant toute l'opération de soudo-brasage. Pour chaque mesure trois thermocouples sont placés sur les éprouvettes, tel que présenté par la figure II.27.

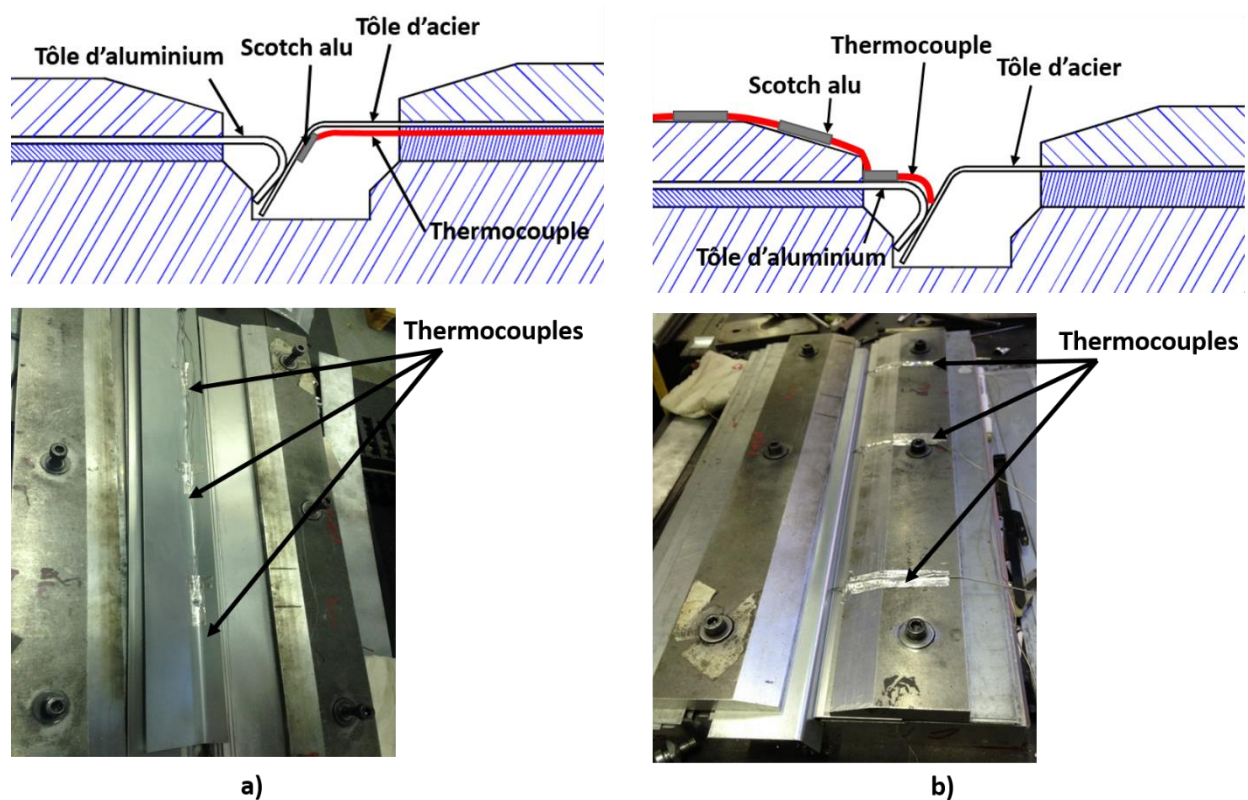


Figure II.27 – Placement des thermocouples sur la face arrière de l'acier a) et dans le bain de fusion b).

Les mesures sont directement enregistrées par une station d'acquisition à la fréquence de 100 Hz et exportées sous Excel.

II.4.4.2. Simulation numérique

Une simulation numérique par éléments finis a également été menée avec le logiciel SYSWELD en complément des essais avec thermocouples. Cette étude numérique est limitée à l'acquisition des cycles thermiques à l'interface acier/aluminium pour notre configuration process. Elle a pour but de nous fournir le cycle thermique en tout point de l'assemblage ainsi que des éléments de comparaison et d'étude de l'impact de la position des thermocouples sur les mesures des cycles thermiques. La dynamique du bain de fusion n'est pas prise en compte lors de la simulation et les pièces sont considérées à l'état solide. L'échantillon simulé a une longueur de 10 mm. La simulation est réalisée sur un ordinateur avec un processeur Intel Xeon W3503, 2,40GHz bicœur avec une mémoire RAM de 24 GB. Le temps de calcul est de 50 min par configuration process.

Les géométries des pièces d'aluminium et d'acier ont été reproduites en fonction des plans des pièces physiques, la géométrie du cordon est quant à elle obtenue à partir d'une coupe macrographique correspondant aux configurations process étudiées. Les pièces sont par défaut à la température initiale de 20°C. Les propriétés des matériaux en fonction de la température sont présentées dans le tableau II.2. L'acier configuré dans SYSWELD correspond au DC04, celui-ci est similaire à l'acier utilisé pour nos expériences.

T (°C)	DC04		AA6016-T4	
	$\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$	$C_p (J.Kg^{-1}.K^{-1})$	$\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$	$C_p (J.Kg^{-1}.K^{-1})$
20	65	480	172	890
100	60			
400	45	595		
560			190	
650			130	
800	28	875		1000

Tableau II.4 – Conductivités thermiques et chaleurs spécifiques des matériaux en fonction de la température [23].

Un maillage solide de type HEXA (TETRA) de taille moyenne 0,2 mm est utilisé pour mailler l'ensemble visible sur la figure II.28.

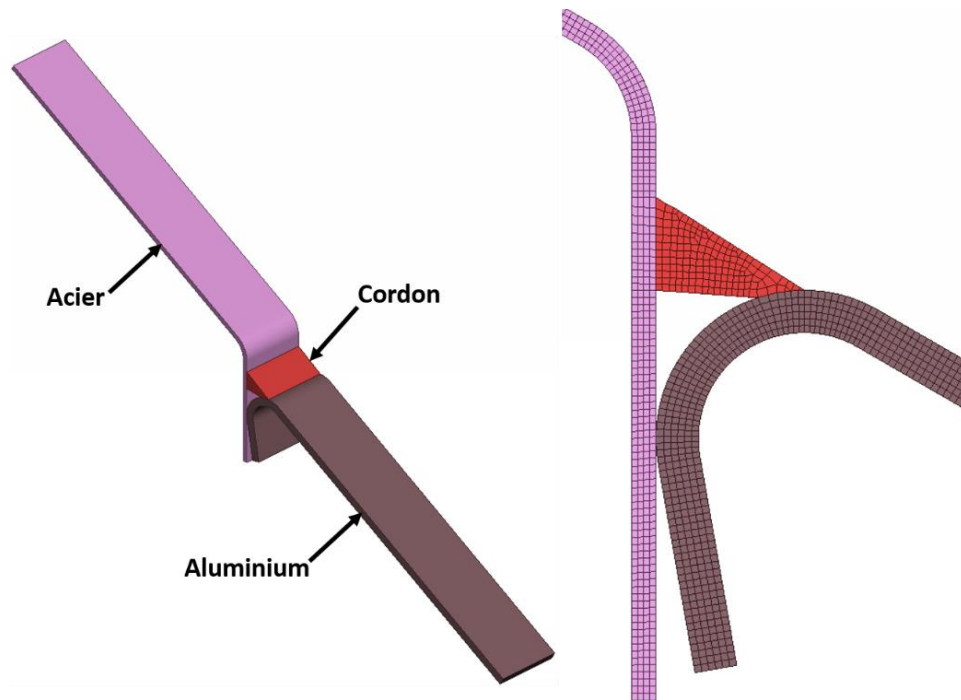


Figure II.28- Représentation de la pièce simulée et maillée, l'acier est représenté en violet, l'aluminium en mauve et le cordon en rouge.

L'ensemble comprend un nombre de 175700 éléments volumiques (exclusivement HEXAS) et 215000 nœuds (3 degrés de liberté mécanique et 1 degré de liberté thermique par nœud). Le bridage des pièces est reproduit par des conditions aux limites d'encastrement, qui consiste à la suppression des 3 degrés de liberté mécanique, pour les zones concernées sur les surfaces supérieures et inférieures. La figure II.29 représente les conditions aux limites imposées.

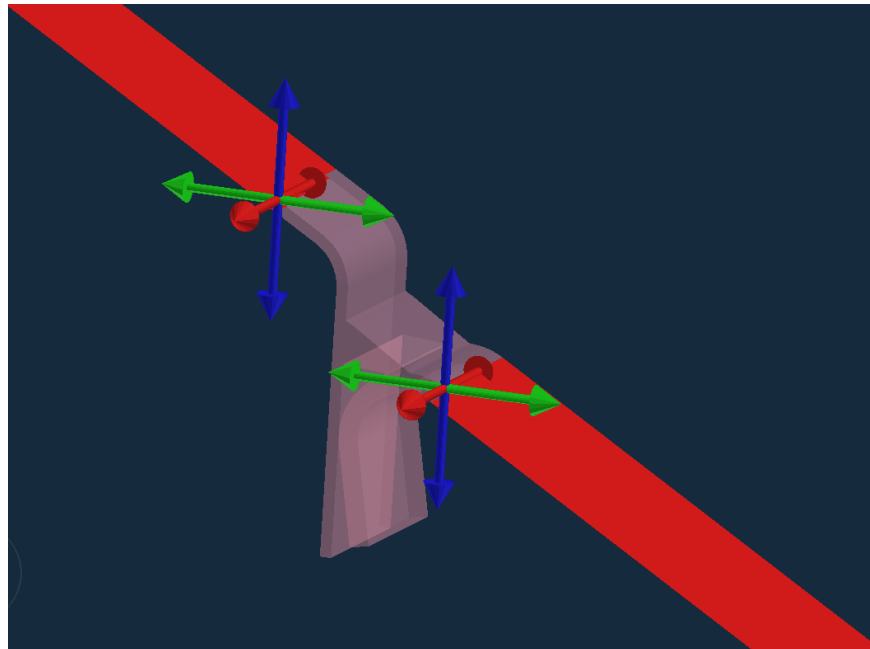


Figure II.29 – Condition limite d’encastrement des surfaces supérieures et inférieures (surfaces rouges) pour reproduire le bridage des pièces physiques.

Un échange de type flux convectif avec le milieu ambiant, air à une température de 20°C, est mis en place. La température initiale des pièces est aussi fixée à 20°C. Les zones en rouge sur la figure II.30 représentent l’ensemble des surfaces d’échanges.

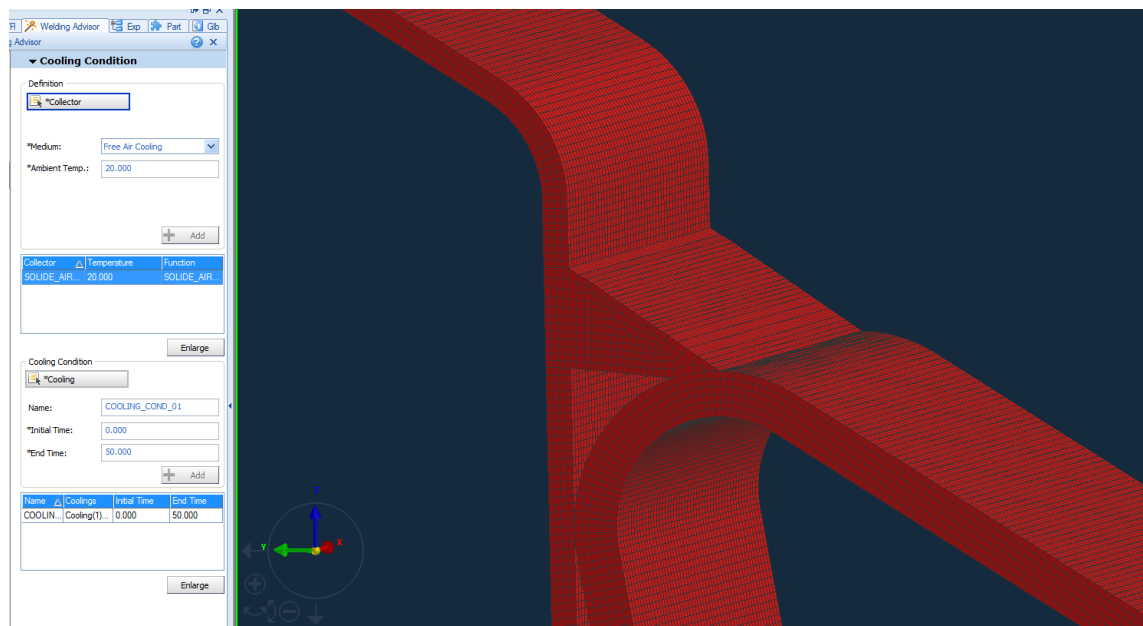


Figure II.30 – Mise en place d’un échange thermique du type flux convectif avec le milieu ambiant, de l’air à température de 20°C, les zones en rouge représentent l’ensemble des surfaces d’échanges.

Le faisceau laser à diodes est modélisé par une source gaussienne disponible dans SYSWELD et similaire au faisceau d'une source laser YAG. La répartition de puissance gaussienne est définie par l'équation suivante :

$$Q(x, y, z) = Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right) \quad \text{Eq II.1}$$

Avec :

- Q : la densité de puissance en $W.m^{-3}$
- Q_0 : flux au centre de la source en $W.m^{-3}$
- r_0 : Distance par rapport à l'axe Z en m

La figure II.31 représente la répartition de puissance de la source gaussienne.

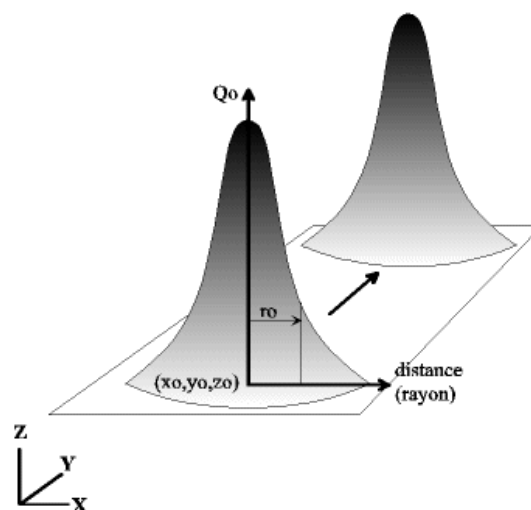


Figure II.31 – Modélisation de la source de chaleur sous la forme d'une répartition gaussienne de la puissance laser.

Les réglages des outils laser sont également reproduits dans SYSWELD :

- La distance focale est réglée à 6 mm avec un diamètre de spot de 3 mm.
- Le faisceau est incliné de 5° dans la direction de soudo-brasage et de 5° en direction de l'aluminium, comme la tête laser sur notre installation.

Les paramètres process sont alors réglés pour les configurations à étudier. Un rendement de 32% représentant l'absorptivité de l'aluminium AA6016-T4 à l'état brut de laminage est utilisé [23]. La figure II.32 représente le passage de la source de chaleur lors de la simulation sur l'échantillon.

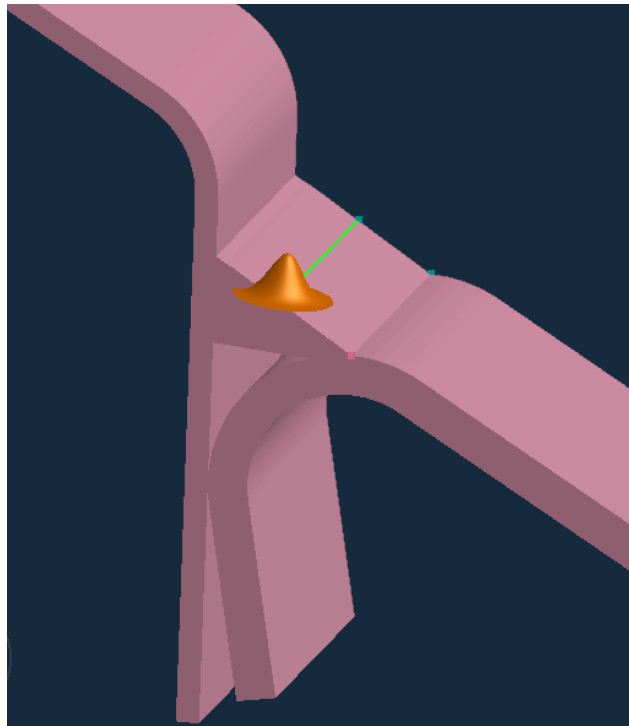


Figure II.32 – Trajectoire suivie par la source de chaleur pendant la simulation sur l'échantillon.

II.4.4.3. Calcul théorique de croissance des composés intermétalliques

Les cycles thermiques obtenus par thermocouples et simulation sont par la suite discrétisés pour mener un calcul de croissance diffusionnel grâce à l'équation II.3 présentée dans le premier chapitre de ce document. Les valeurs obtenues par calcul sont comparées aux épaisseurs mesurées sur échantillons et une analyse critique de la pertinence du modèle pour le soudo-brasage laser à haute vitesse est menée.

II.5. Conclusion

Ce chapitre regroupe les moyens industriels et scientifiques mis en œuvre pour l'étude de la conformité des assemblages soudo-brasés à haute vitesse. L'environnement d'étude a volontairement été construit pour reproduire les contraintes et configurations d'une production industrielle en faisant appel à une installation laser complètement automatisée et instrumentée dans cette logique. La configuration d'étude correspond à l'assemblage d'un pavillon aluminium à un côté de caisse en acier et a pour objectif final une application industrielle du procédé. Cet objectif nécessite une maîtrise totale de la conformité des assemblages produit à haute vitesse de soudo-brasage. Celle-ci passe par une optimisation des paramètres process couplée à une compréhension des phénomènes physiques et métallurgiques. Dans ce cadre, une présentation des moyens de caractérisation des assemblages ainsi que d'analyse de la composition et de la structuration métallurgique des échantillons a été donnée. Les éléments issus de ces mesures permettent l'étude de l'influence des paramètres process sur les critères macroscopiques et microscopiques de la conformité des assemblages. Enfin, la démarche d'étude du lien entre les cycles thermiques à

l'interface acier/aluminium et la formation des composés intermétalliques à haute vitesse de soudo-brasage par instrumentation thermique ainsi que par simulation numérique a été présentée. Les chapitres suivant regroupent et présentent les résultats et observations effectués.