

Ministre de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire de Fin d'Études
Pour l'Obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique

Thème

**Etude conceptuelle de la transformation d'une perceuse en
une machine à souder par friction points**

Encadré par
Mr.Belhadef, ENP

Présenté par
Ammali Mehdi

Juin 2015

Dédicace

A la mémoire de ma grand-mère

Je dédie ce travail à mes parents et mes sœurs pour leur soutien de chaque instant, et pour leur souhait de me voir réussir.

A ma très large famille dont citer les noms ici pourraient occuper des pages et des pages.

Je n'oublierai pas mes amis qui ont rendu mes jours à l'école agréables, Thamila, Abdou, Djamel, Islem, Chawki, Nesrine, Salim, Amira, Mehdi, Sabah. Ainsi que mes amis hors l'école pour leur soutien inconditionnel.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon encadreur monsieur Belhadeb pour sa disponibilité, sa gentillesse, sa patience ainsi que ses précieux conseils. Je tiens ensuite à remercier mes parents et ma famille pour leur soutien durant ces longues années.

Je remercie les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font de juger mon travail.

Je remercie l'ensemble de mes enseignants pour le savoir qu'ils m'ont transmis et en particulier monsieur Guergueb et monsieur Belkacemi qui m'ont aidé pour ce travail.

Je tiens tout particulièrement à remercier « ami Salah » et « ami Douadi » pour leur générosité, leur gentillesse et leur bonne humeur chaque jour que j'ai passé à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Je remercie tous ceux qui contribuent à la science d'une façon ou d'une autre et qui font en sorte qu'on puisse mener nos travaux aujourd'hui.

RÉSUMÉ

Le soudage par friction (FW) est une technique relativement récente qui utilise un outil de soudage non consommable pour générer de la chaleur par frottement et la déformation plastique au lieu de la fusion. Il produit un joint tout en gardant le matériau à l'état solide. Le principal atout du soudage par friction, c'est le fait d'être un processus se produisant à l'état solide qui conduit donc à une diminution importante des défauts liés à la fusion et la ZAT. Il donne une bonne résistance, même dans le cas des alliages qui sont considérés comme non-soudables par les techniques classiques de soudage.

Notre travail consistait à concevoir, en vue de la réaliser, une machine de soudage par friction par points. Pour faire aboutir, avec un minimum de difficultés, la future partie de réalisation nous avons choisi d'utiliser une perceuse et faire l'étude de sa transformation en une FSSW.

Pour la modélisation des éléments et de l'ensemble de notre produit nous avons utilisé un logiciel de CAO « SOLIDWORKS » qui nous a permis aussi d'utiliser des produits standards, importés « moteurs électriques, vérins, distributeurs, pompe hydraulique... ».

Nous jugeons que nous avons atteint les objectifs que nous nous sommes tracé.

Mots clefs : Soudage par friction, conception, CAO, SOLIDWORKS, hydraulique, pneumatique.

ABSTRACT:

Friction welding (FW) is a relatively new technique that uses a non-consumable welding tool to generate heat by friction and plastic deformation instead of melting. It produces a joint while keeping the material in the solid state. The main advantage of friction welding is being a process occurring in the solid state, which therefore leads to a significant reduction in defects associated with the merger and the HAZ. It gives a good strength, even in the case of alloys, which are considered non-weldable using conventional welding techniques.

Our job was to design, in order to achieve a welding machine friction points. To succeed, with a minimum of difficulties, the future of realization we chose to use a drill and make the study of its transformation into a FSSW.

For the modeling of the elements and the whole of our product, we used a software of CAD "SOLIDWORKS" which has also enabled to us to use standard products, imported "electrical motors, jacks, distributors, hydraulic pump...".

We judge that we achieved the goals that we traced ourselves.

Key words: Welding friction, design, CAD, SOLIDWORKS, hydraulics, tire.

ملخص:

لحام الاحتكاك (FW) هي تقنية جديدة نسبيا التي تستخدم أداة لحام غير الاستهلاكية لتوليد الحرارة عن طريق الاحتكاك وتشوه البلاستيك بدلا من الذوبان. وتنتج المشتركة مع الحفاظ على المادة في الحالة الصلبة. والميزة الرئيسية لحام الاحتكاك يجري عملية تحدث في الحالة الصلبة، وبالتالي الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض كبير في العيوب المرتبطة الاندماج وHAZ. أنه يعطي قوة جيدة، وحتى في حالة السبائك، والتي تعتبر غير قابل للحام باستخدام تقنيات اللحام التقليدية.

كان لدينا وظيفة لتصميم، من أجل تحقيق نقاط لحام آلة الاحتكاك. للنجاح، مع حد أدنى من الصعوبات، ومستقبل تحقيق اخترنا لاستخدام الحفر وجعل دراسة تحولها إلى FSSW.

لنمذجة العناصر وكل من منتجاتنا، ونحن استخدام البرنامج من "SOLIDWORKS" CAD مما أتاح لنا أيضا استخدام المنتجات القياسية، المستوردة "المحركات الكهربائية والرافعات، موزعون، مضخة هيدروليكية...".

نحكم أن حققنا الأهداف التي وتتبعت أنفسنا.

الكلمات الرئيسية: لحام الاحتكاك، تصميم، CAD، SOLIDWORKS، الهيدروليكية، والإطارات

Table des matières

Chapitre 1 : Généralités sur le soudage

I.1. Introduction.....	2
I.2. Les procédés de soudage	2
I.3 Soudabilité de l'aluminium	16

Chapitre 2 : Méthodes de Conception SolidWorks

II.1. Présentation de solidworks.....	23
II.2. Fonctionnalités avancées	26

Chapitre 3 : Soudage par friction points FSSW

III.1. Soudage par friction points/ Friction stir spot welding (FSSW)	31
III.2. Avantages et inconvénients de la FSSW par rapport aux méthodes classiques	35
III.3. Revue des Expériences menées dans le domaine	37

Chapitre 4 : Conception de la machine FSSW

IV.2. Présentation générale de la machine.....	52
IV.3. Dimensionnement.....	61
<u>IV.3.1. Efforts</u>	61
<u>IV.3.2. Choix des roulements.....</u>	65
<u>IV.3.3. Choix des vérins</u>	65
<u>IV.3.4. Choix du moteur du shoulder</u>	69
<u>IV.3.5. Poulie et courroie</u>	70
<u>IV.3.6. Vérification clavettes</u>	71
Conclusion générale	75
Bibliographie.....	76
Annexes.....	

LISTE DES FIGURES

Figure 1: soudage à la flamme [2]	4
Figure 2: chalumeau OA	5
Figure 3: soudure à l'arc électrique	5
Figure 4: soudage à l'arc enrobé	6
Figure 5: ensemble pièce à souder baguette [2]	6
Figure 6: Soudage TIG sous argon	8
Figure 7: torche TIG	8
Figure 8: installation TIG [1]	9
Figure 9: Procédé MIG [1]	10
Figure 10: arc plasma et arc TIG [1].....	11
Figure 11: Installation Plasma [1].....	12
Figure 12: soudage par entrainement direct	14
Figure 13: FSW [8]	14
Figure 14: soudage pour une boîte de vitesse [11]	15
Figure 15: soudage d'un piston par friction [11].....	15
Figure 16: soudure hétérogène [11]	16
Figure 17: solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium [12].....	19
Figure 18: types de contraintes dans SolidWorks.....	27
Figure 19: toolbox.....	27
Figure 20: Fonction Photoview	28
Figure 21: rendu réalisé à l'aide de Photoview 360	28
Figure 22: outils du module routing.....	29
Figure 23: exemples d'éléments trouvés sur SolidWorks routing	29
Figure 24: FSSW method Key Hole [20].....	31
Figure 25: refill FSSW méthode 1 [21]	32
Figure 26: refill FSSW méthode 2 [22]	33
Figure 27: Stitch FSSW	34
Figure 28: switch FSSW	34
Figure 29: Processus de soudage FSSW [25].....	36
Figure 30: machine d'essai D'après Schilling et al., 2000 [26]	37
Figure 31: méthode de soudage D'après Schilling et al., 2000 [26].....	38
Figure 32: résistance au cisaillement en fonction de la taille du joint de soudure [27]	39
Figure 33: résistance au cisaillement en fonction de l'épaisseur des tôles [27]	39
Figure 34: dureté en fonction de la distance du centre du joint de soudure [28]	40
Figure 35: design outil de Zhao [29].....	41

Figure 36: configuration de l'essai de soudage [31]	42
Figure 37: microstructure et dureté [31]	45
Figure 38: structure du joint de soudure. [31]	46
Figure 39: microstructure d'une soudure hautement résistante.	48
Figure 40: comparaison entre les zones de soudure [31]	49
Figure 41: vue d'ensemble de la machine	52
Figure 42: Schéma de la perceuse.....	53
Figure 43: organes perceuse	53
Figure 44: Partie rotation gardée de la perceuse.....	54
Figure 45: Schéma de la partie d'entraînement du pion.	54
Figure 46: modification du mouvement de translation de la perceuse	55
Figure 47: Schéma de la FSSW.	55
Figure 48: organes de la machine de FSSW.....	56
Figure 49: porte pion.....	56
Figure 50: pion.....	57
Figure 51: Porte Shoulder	58
Figure 52: shoulder	58
Figure 53: ensemble shoulder.....	59
Figure 54: vue en coupe de l'ensemble	60
Figure 55: Courbe de variation de la force axiale en fonction de l'aire du shouder [33]	62
Figure 56: choix de la force axiale appliquée au shoulder [33]	63
Figure 57: choix du roulement, catalogue SKF. [35]	65
Figure 58: choix du vérin linéaire, catalogue HPS. [36].....	68
Figure 59: Distributeur hydraulique 4/3 pour vérin double effet.	69
Figure 60: moteur à flasque type B5.....	69
Figure 61: poulie crantée.....	71
Figure 62: dimensions des clavettes.[37].....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: spécimens D'après Schilling et al., 2000 [26].....	37
Tableau 2: comparaison de la résistance aux cisaillement entre RSW et FSSW [27].....	38
Tableau 3: paramètres du soudage pendant l'expérience.	42
Tableau 4: performances mécaniques en fonction de la charge de cisaillement [31].....	43
Tableau 5: Resultats [31].....	46
Tableau 6: configuration de l'outil choisi par Jhonson [32].....	61
Tableau 7: forces obtenues par Jhonson [32]	61
Tableau 8: forces appliquées par le shoulder selon Jhonson.....	62
Tableau 9: configuration de l'outil choisi par Ding [34]	63
Tableau 10: forces sur le ping par Ding [34].....	64
Tableau 11: plaque signalétique du moteur du shoulder.....	70
Tableau 12: dimensions des clavettes de la conception.	72
Tableau 13: dimensions des clavettes suivant le diamètre de l'arbre [37]	73
Tableau 14: calculs clavettes.	74

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail fait partie d'un ensemble de travaux de recherche sur le soudage par friction, initiés par le laboratoire GMD.

Depuis quelques années, les enjeux environnementaux s'immiscent de plus en plus souvent dans le monde industriel. En effet, les contraintes en matière énergétique deviennent importantes et sont maintenant largement considérées lors du développement de nouveaux produits et de nouvelles technologies d'assemblage. La légèreté de l'aluminium répond à une grande partie à ces enjeux.

Actuellement l'aluminium et ses alliages posent des problèmes de soudure comme l'apparition d'une zone de fusion large, l'oxydation, les précipitations, les fissures et les porosités. Bien que le soudage sous atmosphère contrôlée TIG et le soudage laser sont d'usage pour le soudage de ces alliages et les aciers INOX ; le soudage par friction, avec ses variantes, offre un grand nombre d'avantages par le fait que l'assemblage du métal se fait à l'état solide.

Dans ce travail nous avons procédé à la conception d'une machine de soudage par friction par points. Dans le but de pouvoir réaliser, dans le futur, cette machine dans un court délai, nous avons opté pour la transformation d'une perceuse se trouvant à l'atelier de soudure du département de Génie Mécanique.

Pour pouvoir faire aboutir ce travail, nous avons commencé par faire un diagnostic de cette perceuse et voir les possibilités offertes. Ce travail a fait l'objet des chapitres suivants :

Une introduction générale.

- Un premier chapitre de généralités sur le soudage ;
- Un deuxième chapitre présentant certains outils particuliers utilisés de SOLIDWORKS.
- Un troisième chapitre sur le soudage par friction points FSSW.
- Dans le quatrième chapitre nous avons traité les le calcul des organes et éléments de notre machine. Et nous avons terminé par une conclusion générale.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SOUDAGE

I.1. Introduction

Le soudage est un moyen d'assemblage métallurgique, indémontable, privilégié pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. C'est une opération micro-métallurgique qui consiste à exécuter un cordon, généralement fondu, créant une liaison des bords de deux pièces, souvent, métalliques.

Il doit assurer une continuité de matière et de la nature des matériaux dans les pièces à assembler, leur conférant ainsi des caractéristiques, équivalentes à celles du métal de base.

Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. De ce fait, les techniques d'assemblages mécaniques (rivetage, boulonnage, agrafage...) ou par adhésion (collage), ainsi que les techniques de brasage ne répondent pas à la définition du soudage.

Le soudage trouve des applications dans différents secteurs d'activité, comme la production, la construction, la réparation et la maintenance...

Il s'applique en premier lieu aux métaux surtout les plus résistants à l'oxydation. Certains alliages sont considérés comme intrinsèquement non soudables.

La soudabilité d'un matériau dépend de ses caractéristiques métallurgiques mais aussi du procédé employé.

Le résultat du soudage dépend à la fois des caractéristiques de l'alliage (composition chimique, épaisseur) du type de métal d'apport, de la préparation et des réglages adoptés pendant le soudage. Il est nécessaire de préchauffer, dans certains cas, les pièces à souder en acier ou en fontes (réparation uniquement) pour éviter la fissuration. L'opération peut être appliquée aux métaux ainsi qu'aux thermoplastiques.

I.2. Les procédés de soudage

Un nombre très important de procédés de soudage sont mis à la disposition des soudeurs. Ils sont différenciés surtout par la nature de la source de chaleur dont la focalisation joue un rôle très important sur le gradient de température. Ce dernier influence d'une manière considérable sur la structure métallographique et la précipitation de combinaisons chimiques donc sur les propriétés chimiques et mécaniques de certaines régions des pièces soudées.

I.2.1. Soudage à la flamme

a. SOUDAGE AU GAZ OU AU CHALUMEAU

Le soudage au gaz ou à la flamme, consiste à assembler des pièces de métal à l'aide d'un métal d'apport amené à fusion par la chaleur de la flamme d'un chalumeau.

Selon le type de pièces à assembler et la résistance de l'assemblage que l'on souhaite obtenir, on utilise différentes techniques.

b. Le soudage oxyacétylénique

- Principe :

Les bouts des deux pièces de métal sont chauffées jusqu'à fusion et le joint, entre elle, est formé de leur propre métal ainsi que du **métal d'apport, sous la forme d'une baguette**. Le métal d'apport qui constituera la soudure est identique au métal de base, la soudure est dite autogène.

La température de chauffe se situe entre 2 850°C et 3 200°C.

Le métal d'apport viendra combler l'espace entre les deux pièces à souder.

Des points de soudure (c'est le pointage) permettront de stabiliser les deux pièces, puis l'espace sera comblé au fur et à mesure par le dépôt du métal d'apport en fusion.

Celui-ci se dépose sous forme de gouttes. Puis le soudeur imprime un mouvement de rotation avec la flamme du chalumeau.

Ce qui donnera cet aspect caractéristique, avec effet de vague, du cordon de soudure au chalumeau.

La chaleur nécessaire est apportée par une flamme obtenue par un mélange de deux gaz, Oxygène et Acétylène.

L'un, l'O₂, le comburant du mélange, a pour rôle d'activer la flamme ; l'autre, l'acétylène, le combustible, celui de la créer.

La densité de l'acétylène est plus faible que l'air. A l'intérieur des bouteilles, il est obtenu à l'aide d'un mélange d'acétone : 1 l d'acétone permet de fournir 24 l d'acétylène.

Ce mélange gazeux est à l'origine de la flamme la plus chaude, 3 200 °C à la pointe du dard. A cette température tous les métaux sont en fusion.

Les deux gaz sont utilisés à basse pression, un détendeur permet l'apport au poste du mélange gazeux à la bonne pression.

Dans le soudage, le contact avec l'air ambiant empêche la soudure de se faire, car il entraîne immédiatement une oxydation des métaux à son contact.

C'est pourquoi, le soudage doit toujours se faire sous protection, ici **protection gazeuse**, qui crée une enveloppe gazeuse entre les métaux et l'air ambiant, ennemi du soudeur.

Définition du soudage OA, ou soudage oxyacétylénique, ou soudage chalumeau :

Le **soudage OA** (Oxygène et acétylène) est un **procédé d'assemblage thermique** qui s'applique aux tôles et aux tubes de même matière dont l'épaisseur reste inférieure ou égale à 2 mm

Principe du soudage OA:

- On mélange deux gaz, l'oxygène et l'acétylène.
- On enflamme le mélange.
- On obtient alors, après réglage une flamme nous permettant de souder.

Description du poste de soudage OA:



Figure 1: soudage à la flamme [2]

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1-Manomètre | 2-Bouteille d'oxygène de transport |
| 3-Bouteille d'acétylène | 4-Chariot |
| 5-Buses | 6-Chalumeau |
| 7-Raccord anti-retour | 8-Tuyau Acétylène de couleur rouge |
| 9-Tuyau Oxygène de couleur bleue | |

Le chalumeau



- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1-Bouton d'acétylène (0,5 Bars) | 2-Bouton d'oxygène |
| 3-La lance | 4-La buse |
| 5-Raccord acétylène (tuyau rouge) | 6-Raccord oxygène (tuyau bleu) |

Figure 2: chalumeau OA

I.2.2. La Soudure à l'Arc Electrique

La figure 3 illustre les différents procédés de soudure à l'arc électrique :

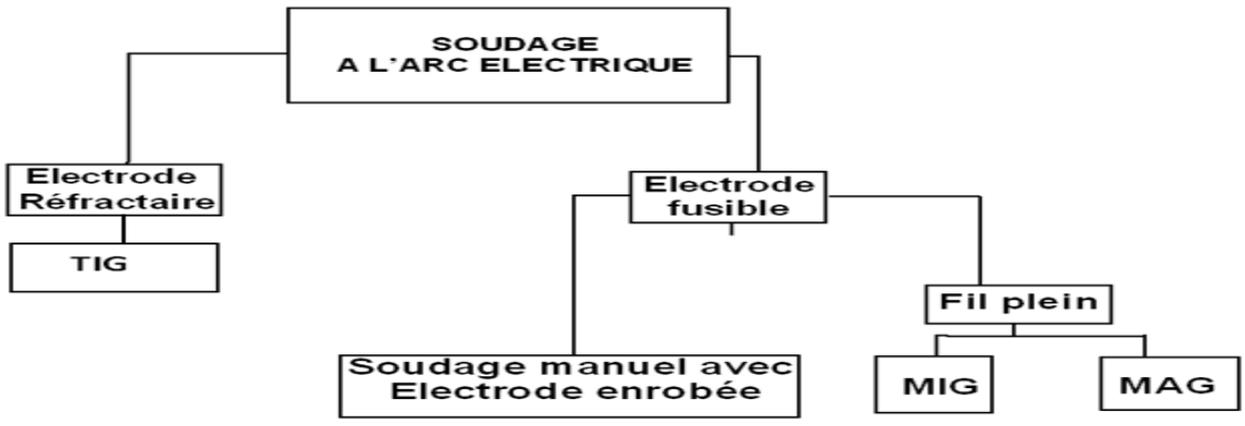


Figure 3: soudure à l'arc électrique

a. Le soudage à l'Arc Electrique à l'Electrode enrobée :

Définitions

Le soudage à l'électrode enrobée est souvent appelé « soudage à l'arc », il utilise des baguettes comme métal d'apport.

La soudure autogène à l'électrode enrobée consiste à mettre en fusion l'acier des pièces à souder et de les assembler grâce à un métal d'apport (l'âme de l'électrode).

Pour obtenir cette fusion, il faut une température très élevée, (3200°C) qui est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode) en créant un "arc électrique" qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois une lumière et une chaleur intense



Figure 4: soudage à l'arc enrobé

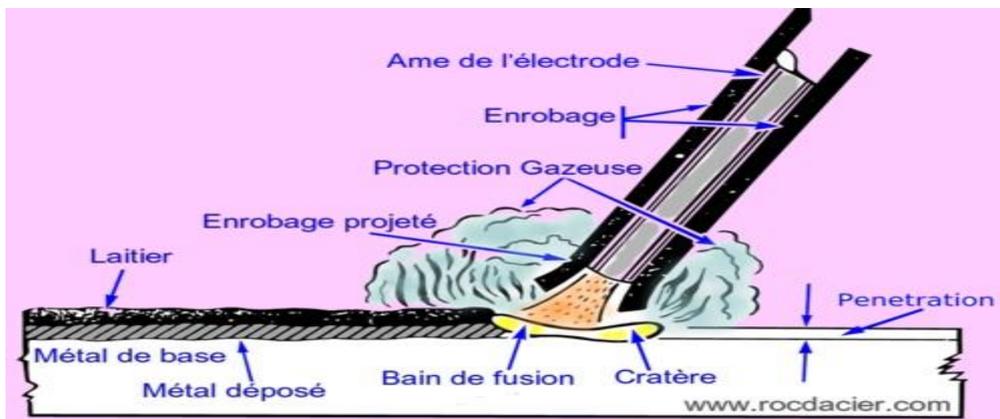


Figure 5: ensemble pièce à souder baguette [2]

Constitution de l'électrode enrobée :

L'électrode enrobée est constituée d'une tige métallique, appelée « âme », recouverte d'un enrobage. Ces deux parties jouent plusieurs rôles afin d'assurer la formation de l'arc ainsi que l'élaboration et la protection du bain de fusion, tout en donnant au cordon de soudure un bel aspect et des propriétés mécaniques intéressantes.

➤ Rôles de l'âme métallique

L'âme métallique de l'électrode assure le passage du courant et la création de l'arc. De plus, elle sert de métal d'apport qui, en se fusionnant, apporte les éléments d'alliage nécessaires à l'élaboration du bain de fusion afin de donner au joint soudé les propriétés mécaniques désirées.

➤ Rôles de l'enrobage

L'enrobage est constitué d'un mélange de différentes substances chimiques qui jouent plusieurs rôles : rôle électrique, rôle métallurgique et rôle opératoire.

L'enrobage de l'électrode

En fondant, l'enrobage de l'électrode remplit différents rôles :

- **Rôle électrique** : l'enrobage permet une bonne circulation du courant électrique, il favorise l'amorçage et la stabilisation de l'arc par ionisation de l'air
- **Rôle physique** : l'électrode est de même nature que le métal de base, la soudure est autogène. L'enrobage confère une protection vis à vis de l'air ambiant, permettant le soudage et l'unification de l'arc électrique.

Il concentre l'arc par la formation d'un cratère à son extrémité, il permet le soudage dans différentes positions et influence la forme et l'aspect du cordon, l'enlèvement des dépôts de laitier.

- **Rôle mécanique** : l'apport de matière confère une solidité à l'assemblage
- **Rôle métallurgique** : il protège le bain de fusion de l'action de l'air par formation d'une pellicule de laitier liquide et d'une veine gazeuse.

Il ralentit le refroidissement et ajoute, dans certains cas, des éléments nécessaires à l'obtention des caractéristiques mécaniques du joint de soudure.

Par ailleurs, l'adhérence du laitier solidifié au cordon de soudure dépend essentiellement du type d'enrobage de l'électrode (acide, basique, cellulosique ou rutile : oxyde de titane TiO_2)

Mais la combustion du métal d'enrobage va être responsable de la projection de scories et de la formation du laitier. Ainsi que de la formation de beaucoup de fumées.

Composition de l'électrode :

- La soudure est de type autogène, le métal d'apport, constitué par l'âme métallique de l'électrode peut être en fonction du métal à souder, de l'acier, du cuivre, de l'inox...
- L'enrobage de l'électrode est variable, différents composants dont le fer, qui est un adjuvant pour le soudage, du cuivre, du manganèse, du silicium, du nickel, du molybdène, de l'acier...et toujours de la poudre de fer.

Choix du type d'électrode et d'enrobage :

Il se fera en fonction de l'application : type d'assemblage (angle, à plat, sur tube...), de l'épaisseur à souder, des qualités requises : dureté, ductilité..., du type d'acier.

b. Soudage à l'arc électrique type TIG Tungsten inert gas

Principe :

Procédé de soudage mis au point aux Etats-Unis.

Il s'apparente au soudage à l'arc, mais en lui apportant des améliorations conséquentes en matière de facilité de mise en œuvre et de qualité de soudure.

Après le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, c'est le procédé le plus répandu.

La chaleur nécessaire à créer la soudure est apportée par un arc électrique. Cet arc électrique est transmis au métal de base par une électrode en tungstène et le bain de soudure est protégé par un flux de gaz inerte.

L'arc électrique généré est stable, précis, capable de souder des métaux très réactifs comme l'Aluminium ou le Titane.

Par exemple le soudage de l'inox, avec le procédé TIG, permet d'éviter la formation d'oxydes de chrome. Formation qui entraînerait localement une baisse de la concentration en chrome et diminuerait sa résistance à la corrosion.

La soudure se fait **sous protection de gaz inerte** (ne présentant pas de danger, pas de risque explosif) Différents types de gaz sont utilisés :

Argon pour l'acier

Argon- Hélium (mélange binaire) pour l'aluminium

Argon- Hélium- Oxygène

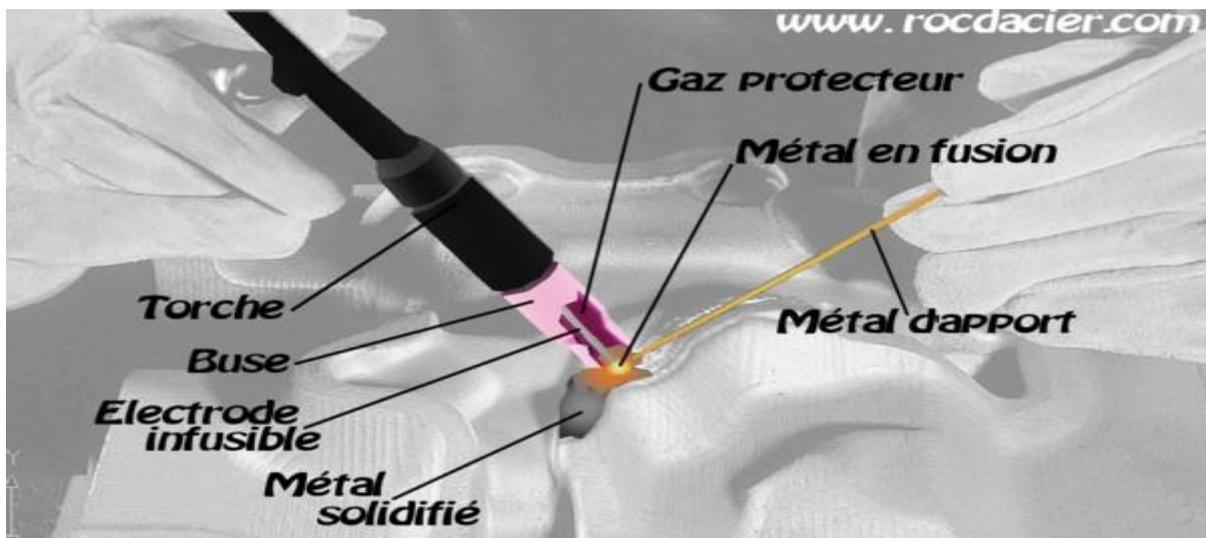


Figure 6: Soudage TIG sous argon

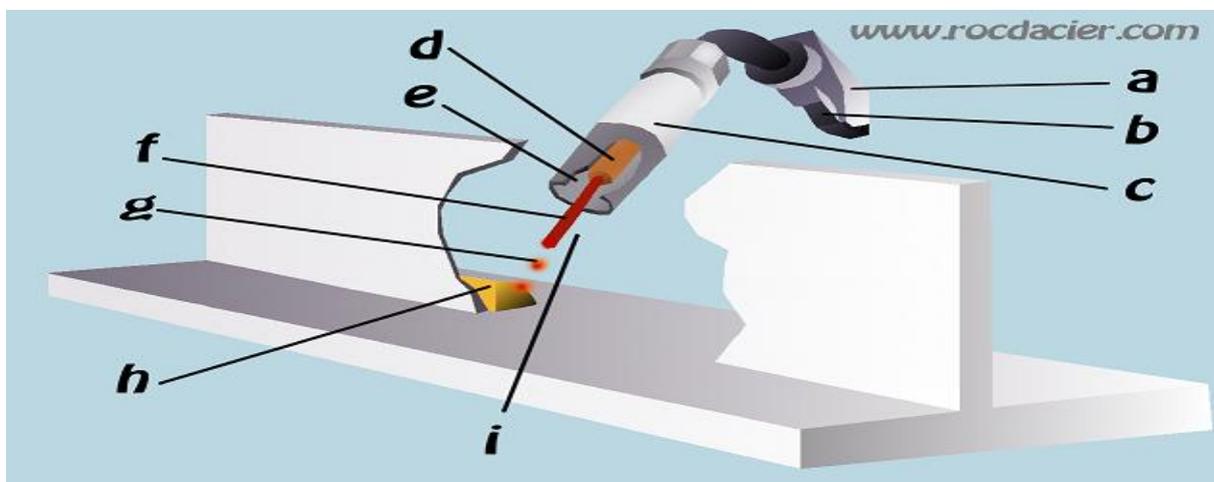


Figure 7: torche TIG

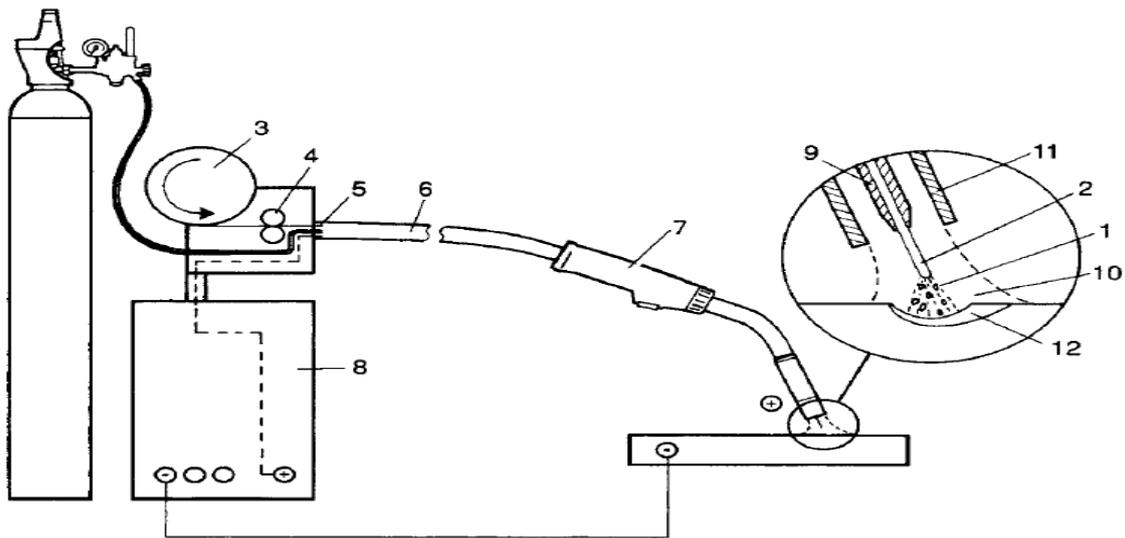


Figure 8: installation TIG [1]

Dans cette technique l'arc électrique et la soudure sont protégés par le gaz.

Ce qui permet de se passer de l'enrobage de la baguette. Ceci amène une diminution substantielle des émissions de fumées.

Une électrode en tungstène réfractaire, non fusible (c'est à dire qui ne fond pas) permet le passage de l'arc électrique (le tungstène est très bon conducteur)

Au tungstène était parfois ajouté du Thorium, à présent interdit et remplacé par du Cérium, pour le soudage sur les aciers alliés.

Pour le soudage sur métaux non alliés, comme l'aluminium, l'électrode est en tungstène pur.

Soudage semi-automatique (MIG, MAG) :

Il s'agit d'un procédé de production en grande quantité. Il est rapide et nécessitant moins de formation pour la mise en œuvre que le procédé TIG. Sans production de laitier comme dans le soudage à l'arc avec électrode enrobée.

Principe :

L'arc électrique est véhiculé par un fil électrode fusible (à la fois métal d'apport et électrode), ceci jusqu'à l'extrémité de la torche de soudage, qui est munie d'une gâchette.

Le fil est disposé sur le dévidoir d'une bobine. Ce dévidoir tourne pour faire avancer le fil à l'aide d'un moteur de 24 Volt. La vitesse du fil en m/min est réglée à l'aide d'un potentiomètre.

Le soudeur appuie sur la gâchette pour débiter le gaz protecteur, alimente l'arc électrique et dévide le fil électrode.

Protection gazeuse inerte (MIG : Metal Inert Gas)

Le gaz s'écoule de façon continue et protège le métal en fusion contre l'oxygène et l'azote de l'air. On utilise en général de l'Argon ou du mélange Argon-Hélium.

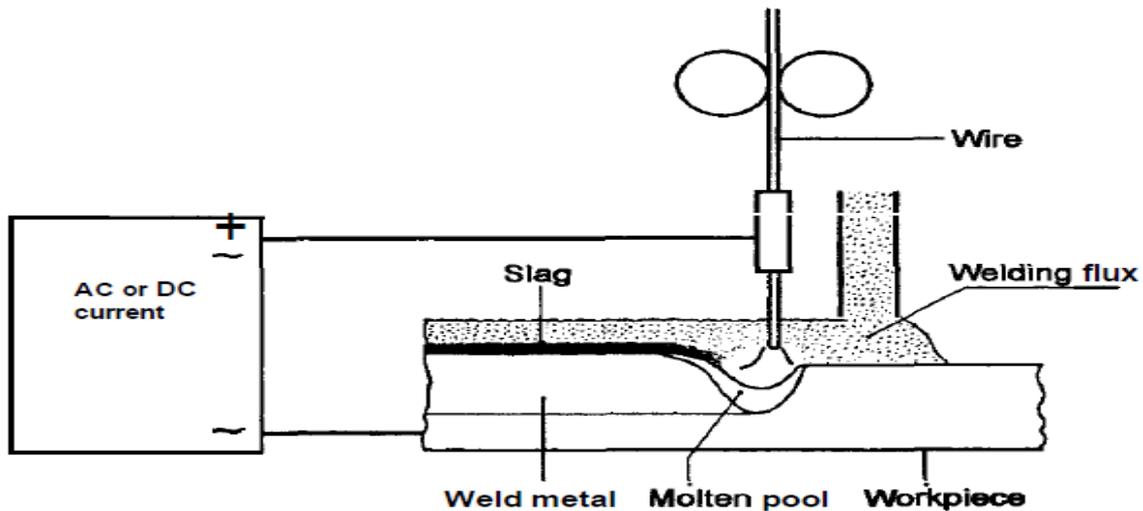


Figure 9: Procédé MIG [1]

Protection gazeuse active (MAG : Metal Active Gas)

Le plus souvent par CO_2 ou mélange Argon- CO_2 ou Argon- CO_2 - O_2 . Le gaz protecteur participe activement au processus en réagissant, dans l'arc, avec les métaux d'apport et de base.

Soudage à l'arc électrique sous flux ou Soudage à l'arc électrique submergé

Dans ce procédé la protection de la soudure se fait, non pas par l'enrobage ni par un gaz, mais par un flux (par exemple sous forme pulvérulente)

Flux qui est déversé automatiquement, par un dispositif, devant le fil électrode.

A noter que le flux peut aussi être présent à l'intérieur du fil électrode qui sera alors appelé « fil fourré ».

Ce flux forme une couche en excès qui protège l'arc. [27]

Il n'y a pas de projections et le cordon de soudure est recouvert d'un laitier auto détachable qui laisse apparaître un métal fondu lisse et brillant.

Il s'agit d'un procédé essentiellement automatique qui produit peu d'émissions de fumées.

- Le flux permet de décaper les pièces à assembler, de faciliter le mouillage de l'alliage d'apport et d'éviter la formation d'oxydes lors du brasage.
- Les flux peuvent être incorporés dans les alliages d'apport. La quantité de flux varie selon les produits de 0,6 % à 3,9 %.
- Les fils à flux incorporé sont parfois appelés fils à âme décapante.
- Les flux peuvent aussi être appliqués séparément sous forme liquide, solide ou pâteuse.
- Le choix du flux approprié dépend essentiellement de la nature des matériaux à braser.

- Les flux peuvent être :
 - ✓ résineux à base de colophane
 - ✓ organiques, non résineux, solubles ou non dans l'eau, à base d'alcools (isopropanol, propanol, éthanol) ou de solvants organiques...
 - ✓ inorganiques, à base de chlorures, de fluorures, de borates, d'acides phosphoriques, d'amines...

Leurs propriétés peuvent être modifiées par l'addition d'agents activant : composés halogénés, amines aliphatiques, acides organiques (glutamique, adipique, formique, oxalique....) hydrazine. [1]

I.2.3. Soudage au plasma

Considéré comme une évolution du soudage TIG, il s'en distingue par le fait que l'arc est contraint mécaniquement (constriction mécanique) ou pneumatiquement (constriction pneumatique), générant ainsi une densité d'énergie supérieure. Le soudage par plasma utilise un gaz de plasma interne et un gaz de protection externe (voir figure :) L'arc peut jaillir entre la tuyère et l'électrode (arc non-transféré) ou entre la pièce et l'électrode (arc transféré) voire être semi-transféré. L'arc de plasma est considérablement rectiligne et plus concentré que l'arc du TIG ce qui le rend les performances de la méthode moins sensibles au changement de longueur de l'arc.

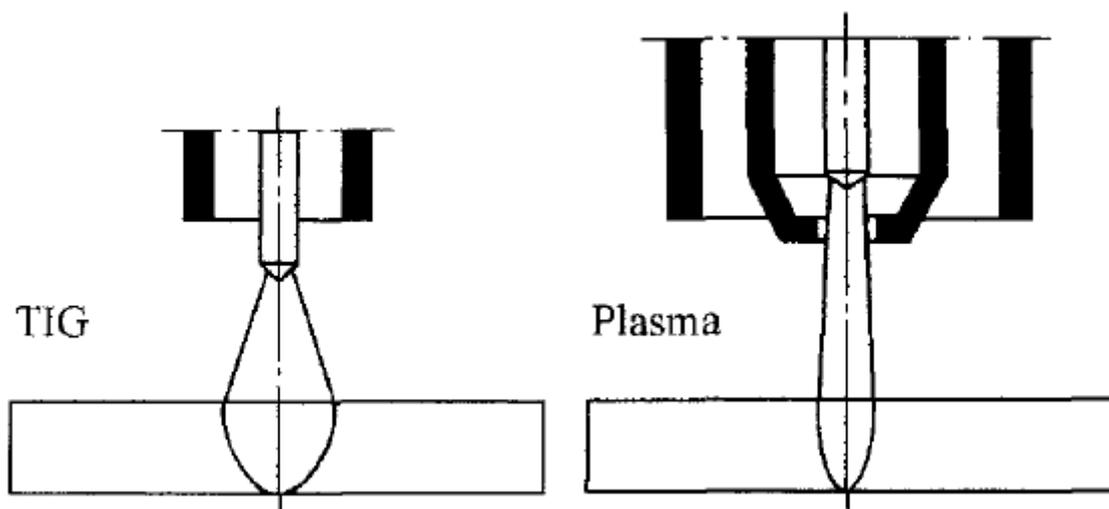


Figure 10: arc plasma et arc TIG [1]

Le soudage plasma peut être réalisé sans chanfrein sur un assemblage en bout à bout d'un dixième de mm jusqu'à des épaisseurs de 8 mm. Dans ce cas, il nécessite très peu de métal d'apport. Il est utilisé quasi exclusivement en mode automatisé (robot) et les vitesses de soudage sont élevées (dizaines de cm par seconde). Cette méthode permet de souder à des températures atteignant les 10 000 °C.

Les avantages de cette méthode sont :

- Un Arc concentré et stable.
- Vitesse de soudage élevée souvent 400% supérieure à celle du soudage TIG.
- Déformation négligeable de la pièce à souder.
- Allumage de l'arc fiable.

- Soudage par fusion possible même pour les matériaux très minces (0.03 mm).
- La zone thermiquement affectée est réduite.
- Evaluation de la qualité de la soudure durant le processus.
- Très bonnes caractéristiques métallurgiques.

Mis à part le magnésium, le soudage au plasma peut être utilisé pour le soudage des mêmes matériaux que le soudage TIG. Il est largement utilisé pour le soudage automatisé des aciers inoxydables.

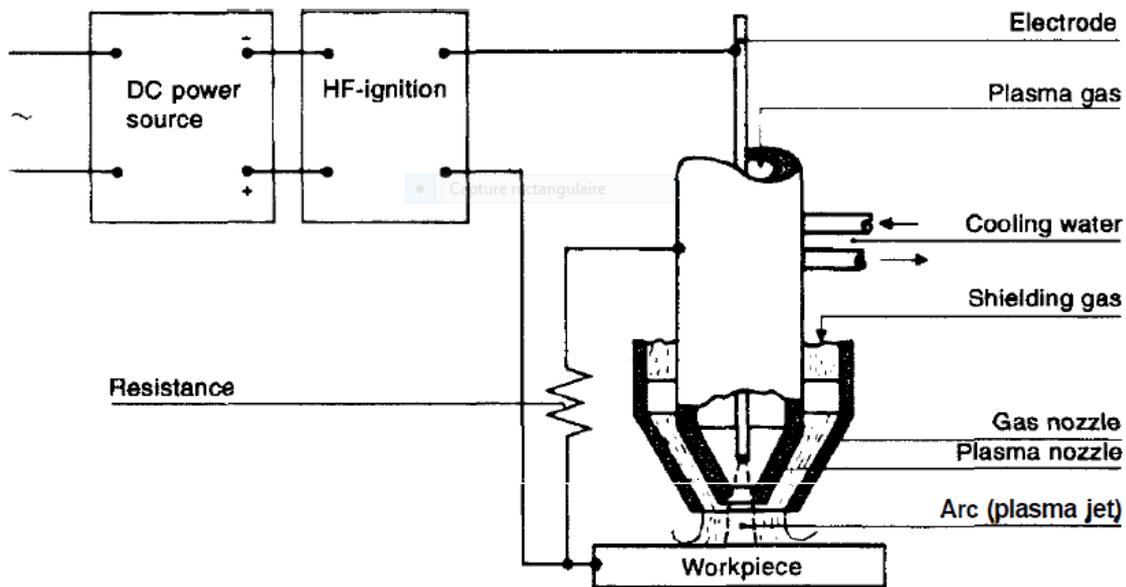


Figure 11: Installation Plasma [1]

I.2.4. Soudage au laser

(LBW : *Laser Beam Welding*)

L'énergie est apportée sous forme d'un faisceau laser. Les sources laser peuvent être de type CO₂ ou YAG, LED ou fibre.

Principe du soudage laser

Un système optique concentre l'énergie du faisceau laser, (10^5 W/cm² à 10^6 W/cm²) et génère un capillaire rempli de vapeurs métalliques dont les parois sont tapissées de métal liquide en fusion. Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se resolidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces.

Plusieurs études sont en cours sur ce procédé, notamment au Centre des technologies de l'aluminium du CNRC (Canada) [3]

I.2.5. Soudage par points.

Le soudage par points est la plus connue des méthodes de soudage par résistance ; il est utilisé pour le soudage de pièces minces dans une configuration superposée. Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie automobile. Le courant élevé ainsi que le temps de soudure rapide implique que l'énergie thermique est utilisée efficacement, très peu est perdue vers le métal voisin. Cette méthode a de nombreux avantages comme :

- Déformation très peu importante de la pièce à souder puisque la propagation de l'énergie thermique est restreinte au voisinage de la soudure.
- Fréquence élevée de production dans les chaînes robotisées.
- Automatisation facile.
- Nécessite peu d'énergie.
- Procédé peu polluant.
- Ne nécessite pas un matériau d'ajout.
- N'a pas besoin d'ouvriers hautement qualifiés.

I.2.6. Soudage par friction

Le soudage par friction ne nécessite une fusion totale des métaux joints.

Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de jointure par rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou par la friction d'un outil sur ces pièces. L'énergie thermique provient du couple résistant et de la vitesse de friction maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage ; la température de fusion n'est jamais atteinte.

Le soudage par friction consiste à transformer l'énergie cinétique d'une pièce mise en rotation en énergie calorifique produite par friction à l'interface des pièces à assembler. La quantité de chaleur générée à l'interface porte rapidement les pièces à la température de soudage ; sans atteindre la fusion du métal. Lorsque le mouvement de rotation s'arrête ; on applique une pression axiale pour compléter l'assemblage par forgeage.

La variante la plus utilisée est le soudage par friction rotative. On peut l'utiliser pour l'assemblage de pièces symétriques en rotation comme des tuyaux ou des barres, mais également pour certaines géométries plus complexes. On distingue d'autres variantes comme le soudage par friction orbitale ou par friction linéaire qui peuvent être utilisés pour souder des pièces ayant une intersection symétrique mais pas en rotation. [6][7]

TYPES DE SOUDAGE PAR FRICTION

- Soudage par entrainement inertiel.
- Soudage par entrainement direct.
- Soudage par friction linéaire.
- Soudage par friction malaxage (FSW). [4]

- Soudage par friction points (FSSW). Soudage par friction radiale [5]

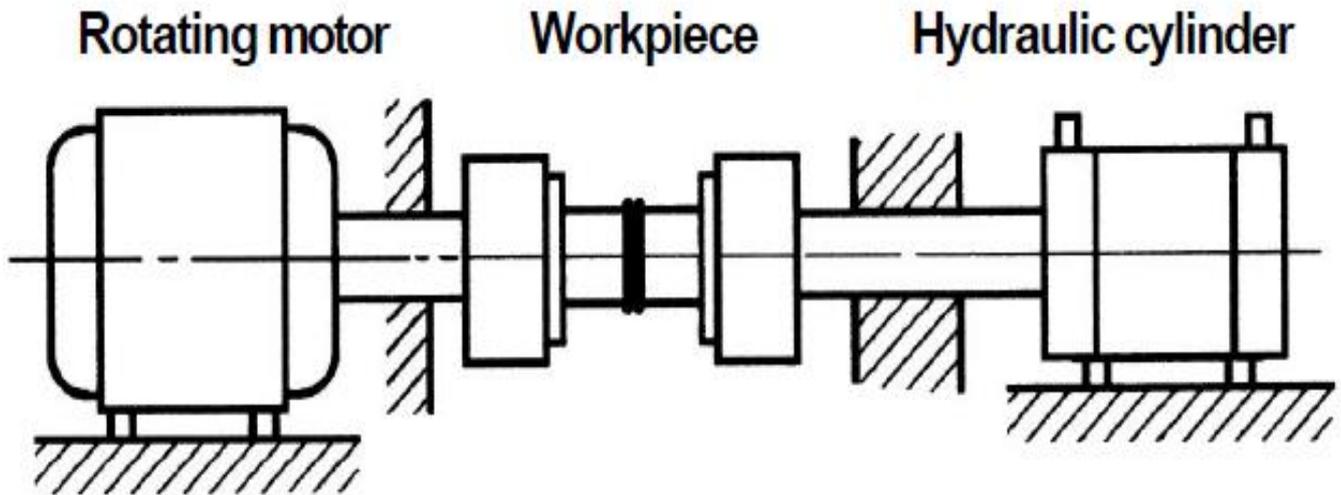


Figure 12: soudage par entrainement direct

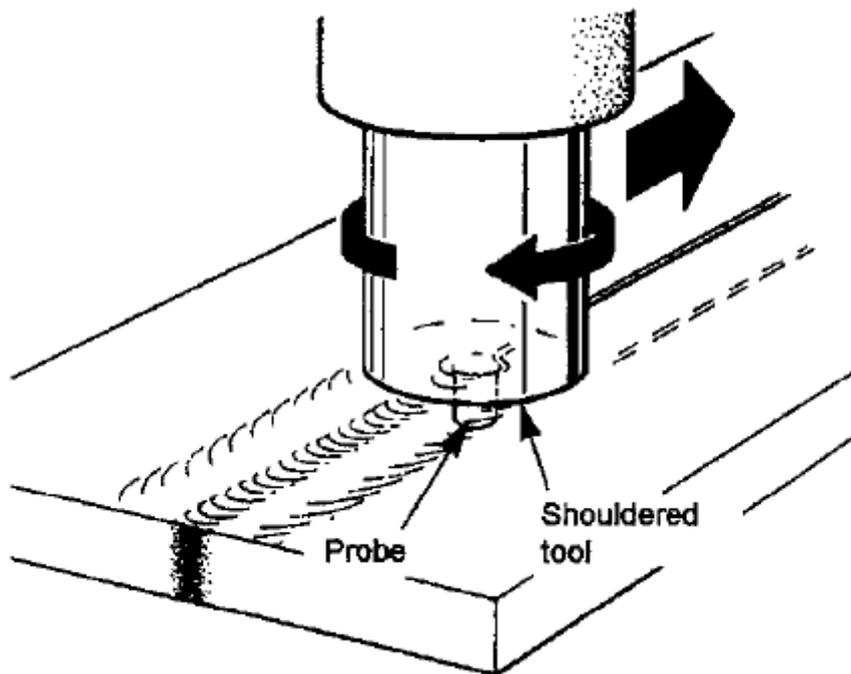


Figure 13: FSW [8]

AVANTAGES DU SOUDAGE PAR FRICTION

- Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique comme le matériau n'est pas porté à fusion.
- Pas de préparation spéciale des pièces.
- Le procédé de soudage est beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.

- Peu de déformations après soudage en raison des temps de soudage courts et des faibles températures maximales.
- Possibilité d'assembler des pièces de sections fortement différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
- Economique : le soudage par friction permet de réaliser d'intéressantes économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau).
- Des matériaux dissemblables peuvent être assemblés, comme l'aluminium ou le cuivre à de l'acier.
- Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
- Métaux d'apport pas nécessaires
- Soucieux de l'environnement : pas de gaz de protection, pas de fumées de soudage ou rayonnement.
- Moins de bruit : les soudures ne doivent pas être meulées
- Pas de nécessité de soudeurs agréés. [9][10].

Applications :

Le procédé de soudage par friction peut être utilisé pour de nombreuses applications. Il est ainsi utilisé, par ex., dans l'aviation et la navigation spatiale pour le soudage de boulons à crochet, pour la fabrication de tiges de piston légères ou pour des éléments de boîtes de vitesse.

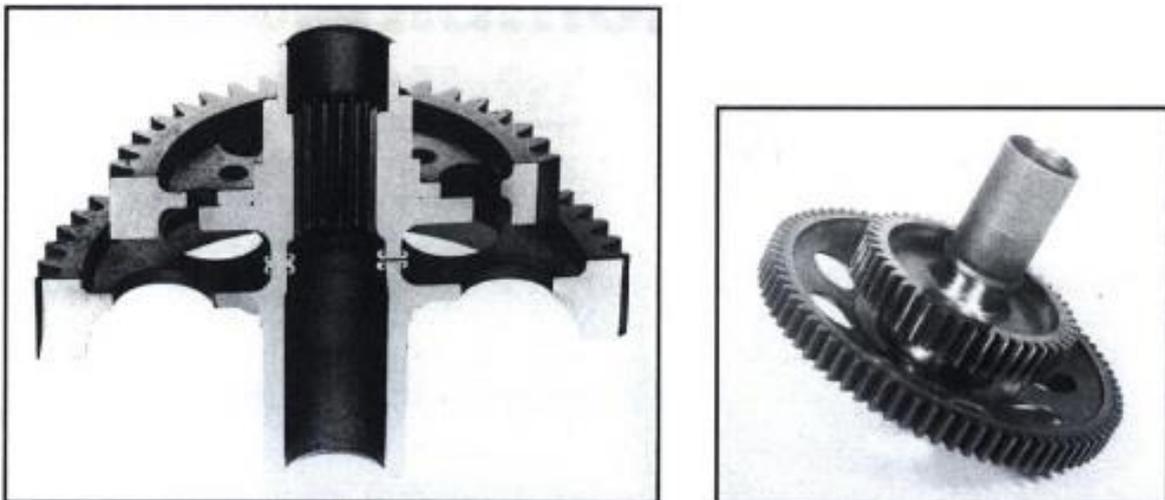


Figure 14: soudage pour une boîte de vitesse [11]

Le soudage par friction est également utilisé dans la pétrochimie, par ex. pour le soudage de brides avec des valves hydrauliques ou pour le soudage de tiges de forage. Les soudures par friction sont suffisamment fortes pour résister aux couples élevés durant le forage.

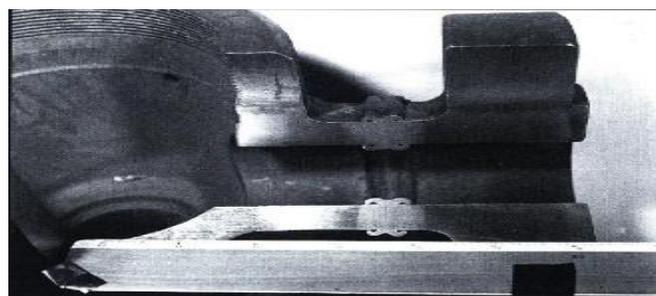


Figure 15: soudage d'un piston par friction [11]

De plus, le soudage par friction permet d'assembler des matériaux ne pouvant être assemblés avec des procédés conventionnels. Exemples : l'aluminium à l'acier ou le titane au cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies par une conception judicieuse de telles pièces : des pièces en un matériau très onéreux peuvent être remplacés par des pièces soudées où les matériaux onéreux ne sont utilisés que localement où c'est nécessaire. Exemple : conception d'une soupape d'un moteur à combustion. Les bases en matériau réfractaire sont soudées à la tige de soupape fabriquée en un matériau résistant à l'usure



Figure 16: soudure hétérogène [11]

Soudabilité

La soudabilité est définie comme étant la capacité d'un procédé de soudage à aboutir à des caractéristiques de soudure aussi homogènes que possible. Cela implique que tous les matériaux affectés par le soudage aient une solidité, une résistance à la corrosion et une résistance à l'oxydation équivalentes à celles du matériau de base. Les critères de sélection du métal soudé sont pour l'essentiel le type du métal d'apport ; le type de matériau de base ; la méthode de soudage et le mode opératoire de soudage. Les propriétés de la ZAT (zone affectée thermiquement) sont, quant à elles déterminées par la composition du matériau de base et la quantité d'énergie thermique dégagée lors du processus de soudage.

Les principaux paramètres qui influent sur la soudabilité sont :

- Les caractéristiques d'oxydation.
- Propriétés thermiques du métal.
- Conductivité électrique.
- Propriétés non magnétiques.
- Propriétés mécaniques.
- Température de fusion du métal quand il est allié.

I.3 Soudabilité de l'aluminium

1.3.1 PROPRIETES PHYSIQUES DE L'ALUMINIUM PUR

- Température de fusion : 660°C. Cette température s'abaisse avec l'accroissement du pourcentage des éléments d'alliage.
- Coefficient de dilatation linéique moyen entre 20°C et 300°C : $\alpha=25.4.10^{-6}K^{-1}$
- Conductibilité thermique à 20°C : 217,6 W.m⁻¹.K⁻¹. La conductivité thermique s'abaisse avec l'accroissement du pourcentage des éléments d'alliage.
-

1.3.2. ALLIAGES TREMPANTS ET NON TREMPANTS

Selon les éléments d'alliage principaux, les alliages d'aluminium sont classés en huit séries :

- 1 xxx : aluminium non allié
- 2 xxx : aluminium / cuivre (0.5 à 8%)
- 3 xxx : aluminium / manganèse (1 à 3%)
- 4 xxx : aluminium / silicium (0.5 à 13%)
- 5 xxx : aluminium / magnésium (3 à 8%)
- 6 xxx : aluminium / magnésium / silicium (Mg : 1.5 à 3% / Si : 0.3 à 1.5%)
- 7 xxx : aluminium / zinc (4 à 5%)
- 8 xxx : aluminium / autres (Fe, Li, Zr,etc.)[16]

On distingue deux familles d'alliages d'aluminium, les alliages à durcissement structural dits « trempant » et les alliages sans durcissement structural dits « non trempant ».

Les alliages sans durcissement structural, séries 1xxx / 3xxx / 4xxx / 5xxx sont durcissables uniquement par écrouissage (déformation à froid).

Les alliages à durcissement structural, séries 2xxx / 6xxx / 7xxx sont durcissables par précipitation (trempe + revenu). Ils sont également durcissables par écrouissage. Le traitement de trempe structurale comprend une mise en solution des éléments d'alliage suivie d'un refroidissement suffisamment rapide (vitesse de l'ordre de $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$) pour maintenir, à la température ambiante, la solution solide existant à des températures plus élevées. Il s'agit de l'état de trempe fraîche¹ où les éléments d'alliage sont en sursaturation. Un traitement de revenu ultérieur, à la température ambiante ou à une température plus élevée, conduit à un durcissement de l'alliage. Le durcissement s'explique par un phénomène de précipitation résultant de la décomposition de la solution solide sursaturée (hors équilibre) au cours du maintien isotherme. Le durcissement obtenu est fonction du temps et de la température de maintien.

Les différents états métallurgiques sont symbolisés par une lettre. On distingue les états O : état recuit, H : état durcis par écrouissage, W : état instable de trempe fraîche après homogénéisation à haute température, T : état durci par revenu.

1.3.3. SOUDAGE

La soudabilité de l'aluminium est définie par les caractéristiques suivantes :

- Une conductibilité thermique élevée (environ 6 fois supérieure à celle des aciers) susceptible de générer des manques de fusion (collages), la température de fusion des alliages d'aluminium est bien en dessous de celles des alliages ferreux. Des apports de chaleur plus importants sont nécessaires au soudage de l'aluminium du fait de sa chaleur spécifique élevée. La conductivité thermique élevée de l'aluminium le rend très sensible aux fluctuations de chaleur durant le processus de soudage.
- La présence d'alumine en surface responsable de la formation de soufflures et à l'origine d'inclusions. L'oxyde d'aluminium fond à environ 2050°C contrairement au métal de base qui fond à 660°C ce qui conduit à une fusion incomplète de la zone à souder si

l'oxyde n'est pas enlevé ou déplacé. Des chlorures et fluorures sont utilisés afin d'éliminer l'oxyde. Ces derniers doivent être enlevés à la fin de l'opération de soudage afin d'éviter la corrosion du métal pendant la mise en service de la pièce.

- Une très faible solubilité de l'hydrogène dans l'état solide à l'origine de la formation des soufflures, les hautes températures dans le bain de soudure autorisent la dissolution d'une quantité importante d'hydrogène, au fur et à mesure que l'aluminium se solidifie la solubilité de l'hydrogène baisse, les quantités d'hydrogène au-dessus de la limite de solubilité peuvent causer des porosités dans le métal si elle ne s'échappe pas de la soudure.
- Le risque de fissuration à chaud pour certains alliages trempant, la solidité du métal peut aussi être réduite dans la ZAT, ceci est dû au fait que le processus de soudage redistribue les éléments durcissant.
- Un coefficient de dilatation thermique élevé à l'origine de retrait de soudage importants et de la tendance à la déformation des pièces assemblées par soudage.
- Conductivité électrique : c'est un paramètre important à connaître pour le soudage à l'arc. Les alliages d'aluminium présentent une conductivité électrique élevée qui permet l'usage de pistolets de soudure à longs tubes de contact. Ceci est rendu possible grâce à l'absence de chauffage par résistance électrique de l'électrode comme c'est le cas pour les électrodes ferreuses.

1.3.4. PROCESSUS DE SOUDAGE DE L'ALUMINIUM

La plupart des alliages des séries 1xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx et les alliages de moyenne résistance de la série 7xxx peuvent être soudés en utilisant les méthodes TIG, MIG ou OFW (oxyfuel gas welding). Les alliages de la série 5xxx, en particulier, ont une excellente soudabilité. Le soudage par fusion est fortement déconseillé pour les alliages de haute résistance des séries 7xxx et 2xxx, ceci est dû au fait qu'ils sont sujets aux fissures dus à la liquéfaction et solidification durant le processus de soudage.

Le soudage par friction (FSW et FSSW) est particulièrement recommandé pour les alliages d'aluminium, il donne d'excellents résultats pour différents types d'alliages inclus les alliages trempant qui sont sujets aux fissures durant les procédés de soudage par fusion. Ces techniques se caractérisent par : La formation de soufflures est principalement liée à la présence d'hydrogène dans le bain de fusion. La solubilité très élevée de l'hydrogène à l'état liquide est quasi nulle à l'état solide, de l'ordre de 0.1 ppm pour l'aluminium pur.

1.3.5. MECANISMES DE FORMATION DES DEFAUTS / REMEDES

Les défauts rencontrés dans le soudage des alliages d'aluminium (soufflures, manques de fusion, fissuration à chaud) peuvent être limités voire supprimés par une préparation adaptée des pièces à assembler, un choix judicieux des paramètres de soudage et un entretien rigoureux du matériel de soudage.

Les sources principales d'hydrogène sont les pollutions de surface des métaux de base et des métaux d'apport, l'humidité absorbée par la couche d'alumine, une mauvaise protection du bain de fusion, l'endommagement du circuit de gaz. En raison de la conductibilité thermique élevée de l'aluminium, la solidification rapide du bain ne laisse généralement pas suffisamment de temps au dégazage du métal fondu. Toute source d'hydrogène doit, de ce fait, être éliminée.

Une attention particulière doit être apportée à la propreté des pièces qui doivent être dégraissées. La condensation de la vapeur d'eau sur les métaux de base et d'apport doit être limitée par un stockage approprié². Le circuit de gaz doit être purgé durant plusieurs minutes avant le démarrage d'une nouvelle opération de soudage pour éliminer les traces d'humidité dans les gaines et au niveau de la torche de soudage. La protection du bain par le gaz de soudage doit être efficace. Elle peut être détériorée par un mode opératoire inadapté (torche trop soulevée ou mauvaise inclinaison de celle-ci, circuit de gaz endommagé) qui permet à l'air ambiant de venir au contact du bain de fusion. Il suffit de 250 ppm d'hydrogène dans le plasma d'arc pour provoquer une quantité de soufflures non acceptable. Lorsque cela est possible, la position de soudage doit être choisie pour permettre un dégazage aisé du bain (soudage à plat). Le dégazage est par exemple difficile, voire impossible, en soudage vertical descendant ou en soudage au plafond. Ces situations se rencontrent en soudage orbital où il est particulièrement difficile de supprimer totalement la formation de soufflures. Enfin, l'emploi d'hélium, gaz « chaud », dans le gaz de protection peut limiter le taux de soufflures en permettant un meilleur dégazage du bain.

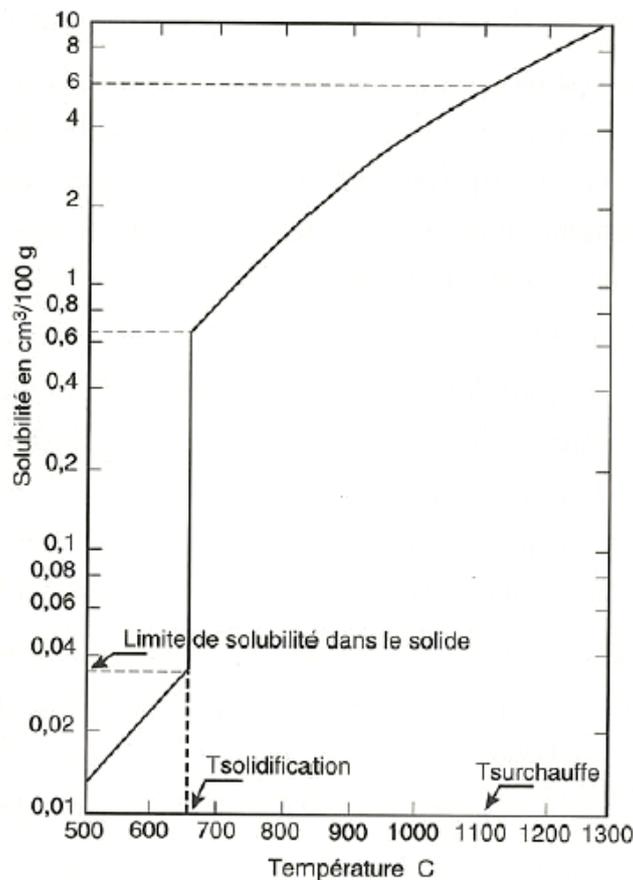


Figure 17: solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium [12]

- 1.3.6. SOUFFLURES

La formation de soufflures est principalement liée à la présence d'hydrogène dans le bain de fusion. La solubilité très élevée de l'hydrogène à l'état liquide est quasi nulle à l'état solide, de l'ordre de 0.1 ppm pour l'aluminium pur.

- 1.3.7. MANQUES DE FUSION

Les manques de fusion ou collages sont liés à la forte conductivité thermique de l'aluminium. Le risque augmente avec l'épaisseur des pièces à souder ou dans le cas d'assemblages d'éléments de différentes épaisseurs.

Ces défauts sont limités par l'emploi de paramètres visant à augmenter l'énergie de soudage (emploi d'hélium dans le gaz de protection, soudage forte intensité), par le choix d'une configuration d'assemblage adaptée permettant de garantir une bonne fusion des bords. L'ouverture du chanfrein doit être importante en soudage TIG et MIG, pour permettre une incidence correcte de l'arc. Dans le cas du soudage de fortes épaisseurs ou d'assemblages d'épaisseurs différentes, il est en généralement indispensable de préchauffer les pièces de l'ordre de 100°C à 150°C.

- 1.3.8. INCLUSION D'ALUMINE

L'alumine est sous forme « pure » Al_2O_3 pour l'aluminium non allié, ou sous forme d'un mélange d'oxydes pour les alliages. Son épaisseur, de l'ordre de 0.01 μm pour une couche fraîchement constituée, atteint plusieurs μm après quelques semaines. Cet oxyde réfractaire (température de fusion 2030°C) n'est pas fondu dans l'arc de soudage et ne se dissout pas dans l'aluminium liquide. On retrouve l'alumine sous forme de « peaux » dans la soudure. Ces peaux sont assimilables à des fissures, dénommées oxid notches en anglais, et doivent de ce fait être évitées.

La mise à nu de la surface par décapage mécanique (usinage sans lubrifiant ou grattage) ou chimique (bain acide ou alcalin) permet de supprimer les inclusions d'alumine. Pour être efficace, le décapage doit être effectué peu de temps avant l'opération de soudage, immédiatement avant soudage pour obtenir un niveau de qualité élevé.

- 1.3.9. FISSURATION A CHAUD

La fissuration à chaud concerne certains alliages trempant. On distingue la fissuration à chaud, en cours de solidification, qui affecte uniquement le métal fondu et la fissuration se produisant dans le métal de base en fin de solidification.

La fissuration en cours de solidification dans le métal fondu est due à la ségrégation d'éléments d'addition dans les espaces inter dendritiques, aux joints de grains. La ségrégation est responsable de la formation de liquides de composition eutectique à bas point de fusion, susceptibles de se séparer sous l'effet des contraintes de solidification (contraction volumique du bain de fusion de l'ordre de 5% en cours de solidification) et des contraintes de bridage dues à la géométrie et à l'épaisseur des pièces. La sensibilité à la fissuration dépend du pourcentage des éléments d'addition. Pour chaque alliage, il existe un domaine de composition où la

sensibilité est maximale. La fissuration en fin de solidification dans le métal de base se produit en limite de Zone Affectée Thermiquement (ZAT). Elle résulte de la formation de films liquides inter granulaires par suite de liquation de phases déjà en place ou formées par diffusion d'éléments au cours du chauffage de l'alliage.

La fissuration à chaud est évitée en jouant sur la configuration de soudage (limitation du bridage), sur les paramètres de soudage et en employant, lorsque cela est possible, un métal d'apport adapté.

L'énergie de soudage doit être de préférence faible pour limiter la grosseur de grain et avoir un volume de bain réduit qui minimise les contraintes de retrait. L'emploi d'un métal d'apport de nuance différente du métal de base diminue fortement la sensibilité à la fissuration par un effet de dilution. Les métaux d'apport séries 4xxx et 5xxx sont, par exemple, employés pour le soudage des séries 6xxx et 7xxx. Les métaux d'apport 4xxx présentent une très bonne soudabilité opératoire, leurs propriétés mécaniques (ténacité et allongement à la rupture) sont en revanche faibles. Les métaux d'apport 5xxx ont de meilleures propriétés mécaniques mais sont moins tolérants vis-à-vis de la fissuration du fait d'une température de fusion plus élevée qui génère un risque de liquation (brûlure). Pour les alliages non trempant (ne présentant pas de risque de fissuration à chaud) les métaux d'apport employés sont identiques aux métaux de base.

CHAPITRE II : METHODES DE CONCEPTION SOUS SOLDIWORKS

II.1. Présentation de solidworks

SolidWorks est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

II.1.1. Les pièces

La pièce est l'objet 3D monobloc. La modélisation d'une telle entité dépendra de la culture de l'utilisateur. Comme de nombreux logiciels conviviaux, SolidWorks permet d'aboutir à un même résultat apparent par des voies souvent différentes. C'est lors de la retouche de ces fichiers ou de leur exploitation qu'on appréciera la bonne méthode.

Une pièce est la réunion d'un ensemble de fonctions volumiques avec des relations d'antériorité, des géométriques, des relations booléennes (ajout retrait)... Cette organisation est rappelée sur l'arbre de construction. Chaque ligne est associée à une fonction qu'on peut renommer à sa guise.

Parmi les fonctions génératrices on trouve :

- l'extrusion : déplacement d'une section droite dans une direction perpendiculaire à la section. La section est définie dans une esquisse (qui apparaît alors dans l'arbre de création comme élément générateur de la fonction). Cette esquisse contient l'ensemble des spécifications géométriques (cotation) nécessaires à la complète définition de la section. Cet ensemble de cotes auquel il faut ajouter la (ou les) longueur d'extrusion constitue l'ensemble des paramètres de la fonction ; il est possible de les modifier une fois la fonction validée.
- la révolution : déplacement d'une section droite autour d'un axe, ou extrusion suivant un cercle ou un arc de cercle.
- le balayage : déplacement d'une section droite le long d'une ligne quelconque. Lorsque la génératrice de balayage est gauche, l'esquisse est en 3 dimensions

D'autres fonctions, plutôt orientées métier intègrent des notions qu'il serait fastidieux de modéliser :

- congés et chanfreins,

- nervure,
- dépouille,
- coque (permettant d'évider un objet en lui conférant une épaisseur constante),
- trous normalisés (perçages, mortaises...),
- plis de tôle...

Des fonctions d'ordre logiciel comme la répétition linéaire, circulaire, curviligne ou par symétrie...

Les dernières versions autorisent la réalisation de pièces momentanément disjointes, ce qui permet de concevoir un objet fonctionnellement, c'est-à-dire en définissant d'abord les éléments fonctionnels, puis en joignant les différentes parties par de la matière (nervures, carter...).

L'édition de familles de pièces est possible en associant à SolidWorks, le tableur Microsoft Excel : Un tableau devient ainsi éditeur des références (lignes) donnant la valeur des paramètres variables des fonctions (colonnes) :

- valeur de certaines cotes ;
- valeur de certaines propriétés (nombre d'occurrence...) ;
- état de suppression d'une fonction.

Ainsi, il est possible d'obtenir à partir d'un seul fichier de type pièce, l'ensemble des modèles de vis d'assemblage (toutes forme de tête ou dimensions), ou encore toutes les combinaisons de briques Lego (1x1, 1x2 etc).

Avec tous ces outils, la méthode de conception d'une pièce très proche du métier du concepteur qui ne se soucie plus de savoir où placer les traits du dessin mais les formes de la pièce.

Les possibilités d'éditations sont complétées par un ensemble d'outils de mesures géométriques. Ainsi il est possible de connaître le volume de la pièce, son poids, la position du centre de masse, sa matrice d'inertie, la surface...

II.1.2. Les assemblages

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition de pièces. La mise en position de pièces est définie par un ensemble de contraintes d'assemblage associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxialité...). Dans une certaine mesure, ces associations de contraintes s'apparentent aux liaisons mécaniques entre les pièces. Le mécanisme monté, s'il possède encore des mobilités, peut être manipulé virtuellement. On peut alors aisément procéder à des réglages à l'aide des différents outils disponibles (déplacement composants, détection de collision ou d'interférence, mesure des jeux, etc.)

Comme pour les pièces, la gestion de l'ensemble est portée par un arbre de création qui donne accès à l'arbre de création de chaque pièce. Il est d'ailleurs possible d'assembler des *assemblages*, donc de former des *sous-groupes* de pièces. Cette opération étant préalable ou en cours d'édition.

L'intérêt de cet outil, c'est qu'il rend possible la création d'une pièce dans l'assemblage. Il propose la même méthode au concepteur que celle qu'il appliquait sur la table à dessin : tout concevoir en même temps. En effet, à part sur les petits ensembles simples (ou déjà définis), il n'est pas raisonnable de concevoir chaque pièce dans son coin pour corriger ensuite, lors de l'assemblage, les problèmes éventuels d'interférence, ou de coïncidence. La conception intégrée lie automatiquement les géométries des pièces entre elles, si bien qu'une modification sur une, est automatiquement répercutée sur les autres. Alors l'édition de pièce est la conséquence de l'édition de l'ensemble. De plus, Solidworks gère les références cycliques. En effet, non seulement il est possible de créer une (des) pièce(s) enfant(s) à partir de la pièce parent, mais il est aussi possible de modifier la pièce parent en fonction de(s) la pièce(s) enfant(s) sans générer de boucle de mise à jour comme sur CATIA.

II.1.3. Mises en plan

Les mises en plan concernent à la fois les pièces (dessin de définition) ou les assemblages (dessin d'ensemble). Pour aboutir à un plan fini d'une pièce on peut estimer mettre 2 fois moins de temps qu'avec un outil DAO (temps de conception et exécution du dessin). En effet, en DAO, chaque trait est indépendant, et c'est au dessinateur de savoir quelles entités graphiques sont concernées par une modification. Le logiciel 3D ne fait qu'une projection de l'objet. Les modifications éventuelles sont opérées sur l'objet représenté, et ne concernent pas directement le plan.

- Vues

La projection sur plan du modèle ne pose aucun problème. Aujourd'hui il est très facile d'obtenir un plan, forcément juste. Les vues en coupes, les vues partielles, perspectives, sont exécutées d'un simple clic. Les seuls problèmes encore rencontrés concernent la représentation des filetages et taraudages dans les assemblages.

De plus, chaque vue peut être exécutée avec un habillage différent, filaire, conventionnel ou ombré rendant encore plus accessible la lecture de plans aux non-initiés.

- Cotation

La cotation regroupe l'ensemble des spécifications géométriques définissant la pièce. Bien sûr, les paramètres déclarés des esquisses en font partie. Ils peuvent être automatiquement intégrés, de manière équilibrée, à la mise en plan. À ce niveau, il est encore possible de modifier la pièce en changeant la valeur des côtes. L'indépendance de ces paramètres, se rapproche du principe dit d'indépendance (cotation GPS). Cependant, la mise en forme définitive de la cotation demande encore un peu de travail (avec un éditeur DAO ou sur le calque aussi !).

- Fond de plan

SolidWorks par défaut propose ses propres fonds de plan. Mais il est possible de les faire soi-même ; Il existe deux types de fond de plan :

- Le fond de plan statique, où il faut remplir à la main chacun des champs.
- Le fond de plan dynamique, où il se remplit automatiquement suivant les paramètres mis dans l'assemblage ou dans la pièce.
- Des modèles sont proposés (équivalent du *.dot* de word).
- Nomenclature

Le fichier assemblage contient chacune des pièces qui composent l'assemblage, on peut donc sortir de façon automatique la nomenclature appartenant à la maquette 3D.

II.2. Fonctionnalités avancées

Au cours de notre conception nous avons utilisé un certain nombre de fonctionnalités avancées disponibles sur SolidWorks, ceci pour simuler au mieux le fonctionnement réel de la machine, réaliser des géométries complexes, réaliser un circuit hydraulique, insérer des éléments standards, générer un rendu réaliste de la machine.

II.2.1. Contraintes d'assemblage

SolidWorks nous offre la possibilité d'utiliser une large gamme de contraintes afin de reproduire aux mieux les conditions réelles de la machine. Ces contraintes sont divisées en 3 sous-groupes :

Contraintes standards :

Ces contraintes nous permettent de disposer correctement les différentes pièces de notre assemblage. On peut citer l'exemple de deux cylindres coaxiaux, en sélectionnant les deux cylindres et en choisissant la contrainte coaxiale, on assurera la disposition correcte de ces deux cylindres même si on leur change de position

Contraintes avancées :

Ce type de contrainte assure un positionnement plus complexe, comme les glissières ou le suivi d'une trajectoire.

Contraintes mécaniques :

Ce type de contraintes nous permet de simuler l'action de différents systèmes mécaniques tels que les engrenages, les cames, pignon crémaillère, pivots...Etc.

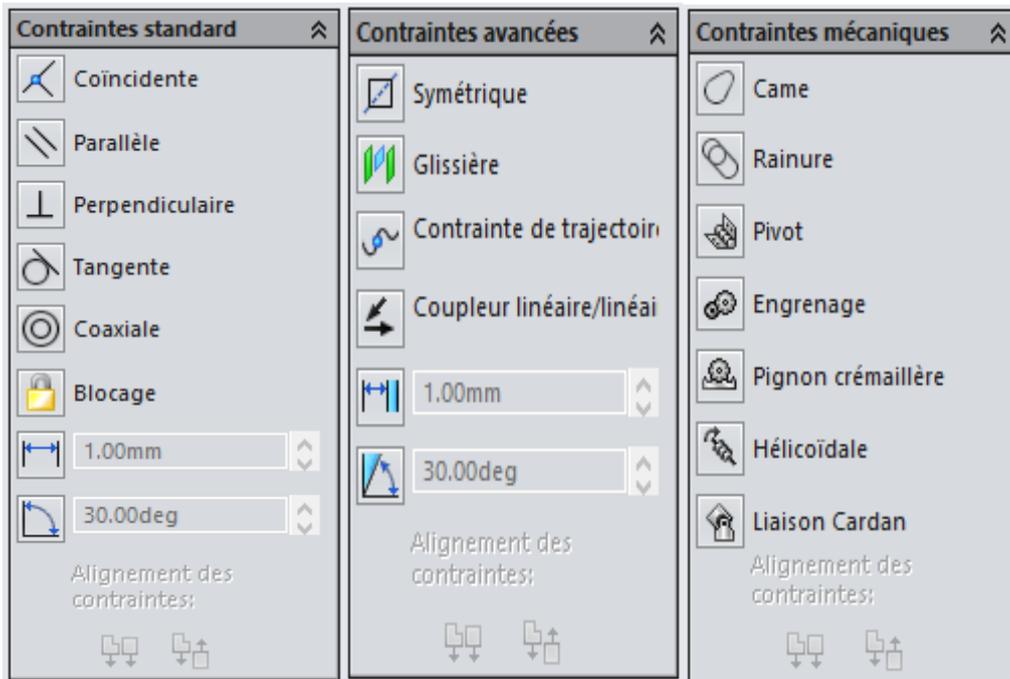


Figure 18: types de contraintes dans SolidWorks

II.2.2. Éléments standards

Les différents éléments normalisés, à savoir, les engrenages, visserie, roulements, joints sont référencés dans une bibliothèque de SolidWorks nommée « Toolbox ».



Figure 19: toolbox

Il n'est pas nécessaire de faire nous même le dessin de ces pièces il suffit de les importer.

Les autres éléments : moteurs, pompes, distributeurs hydrauliques, vérins, poulies peuvent être importés de bibliothèques externes à SolidWorks généralement disponibles sur des sites internet.

Certains sites proposent des catalogues complets ou on peut à titre d'exemple choisir le vérin idéal pour notre conception.

PRODUITS OFFICE :

Les produits office sont des modules complémentaires de SolidWorks offrant plusieurs possibilités.

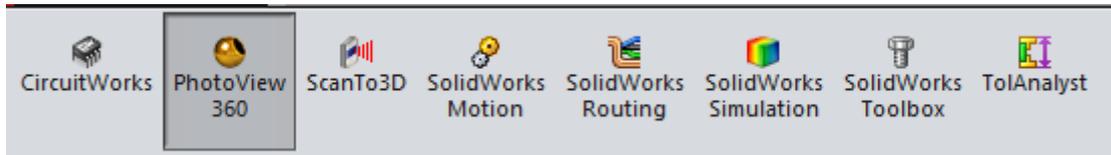


Figure 20: Fonction Photoview

SolidWorks motion : ce module permet de réaliser d'animer les assemblages.

SolidWorks simulation : il nous permet d'étudier les contraintes dans le système à travers une simulation numérique.

Photoview 360 : ce module permet de générer un rendu très réaliste des pièces conçues par SolidWorks.

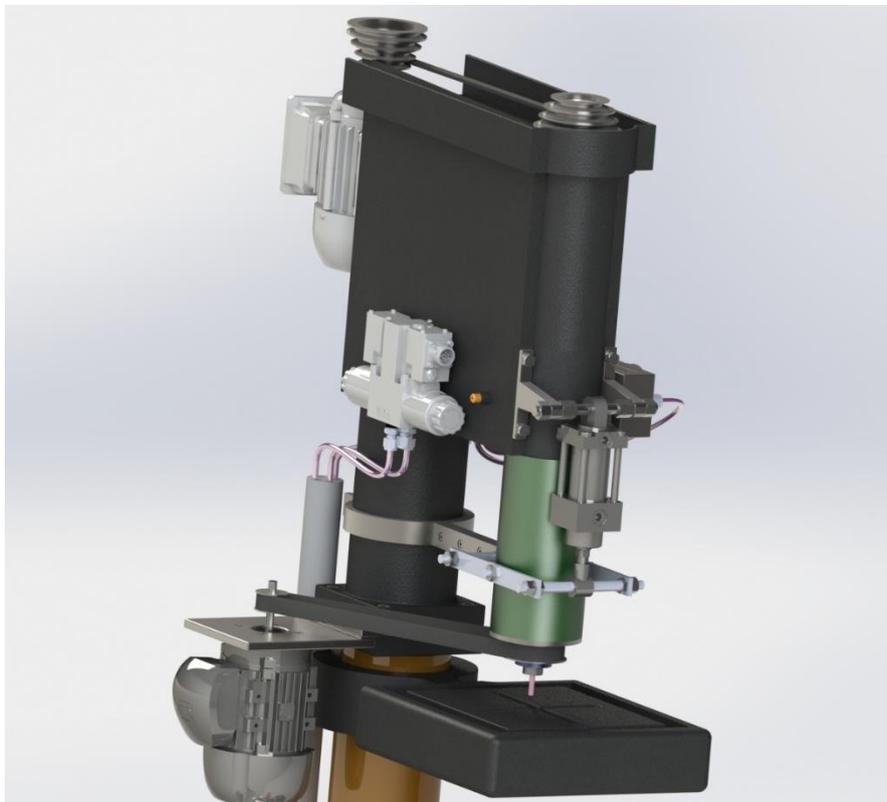


Figure 21: rendu réalisé à l'aide de Photoview 360

Routing : c'est un module qui permet de créer des circuits hydrauliques ou pneumatiques sur SolidWorks.

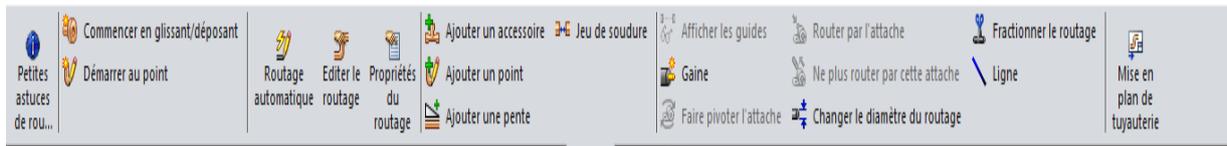


Figure 22: outils du module routing

Ce module offre de nombreux éléments standardisés utilisés en hydraulique comme le montre la figure suivante :

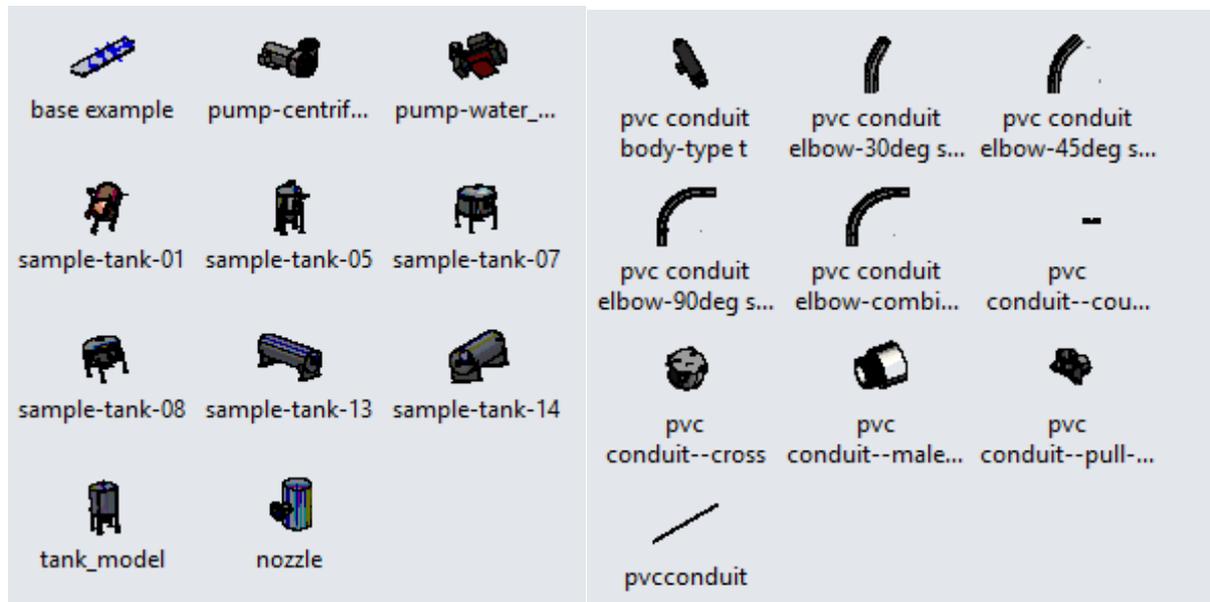


Figure 23: exemples d'éléments trouvés sur SolidWorks routing

CHAPITRE III :
SOUDAGE PAR
FRICTION POINTS
FSSW

III.1. Soudage par friction points/ Friction stir spot welding (FSSW)

Le soudage par friction points (FSSW) est une nouvelle technique de soudage à l'état solide (le métal n'atteint pas sa température de fusion durant le processus de soudure) développée par Mazda Motor corporation et Kawasaki Heavy industry comme une extension du soudage par friction malaxage (FSW), Mazda a rapporté une réduction du coût énergétique du soudage par rapport à la méthode de soudage par résistance (RSW). Cette méthode donne des soudures plus solides, avec une meilleure espérance de vie, moins de contraintes résiduelles ainsi qu'une excellente résistance à la corrosion.[18]

Cette technique est basée sur l'usage d'un outil composé de deux cylindres coaxiaux non consommables, un cylindre intérieur appelé « pin » et un cylindre extérieur appelé « shoulder », un troisième cylindre, le presse tôle, a pour rôle de maintenir les pièces à souder.

Les pièces à souder sont mises dans une configuration superposée, le pin et le shoulder sont animés d'un mouvement de rotation qui leur permet de générer la chaleur nécessaire au processus de soudage grâce au couple de frottement produit.[19]

Le soudage par friction points se décline en plusieurs versions :

Plunge Type FSSW

C'est la technique la plus couramment utilisée dans l'industrie. Un outil rotatif avec un Pin saillant est plongée dans les pièces à souder de la surface de l'une d'elle jusqu'à une profondeur définie au préalable, après un certain temps de soudage, l'outil est retiré laissant un trou dans la tôle. La chaleur générée par la friction à l'interface de l'outil et de la pièce à souder ramollit le matériau, la rotation et le déplacement du pin provoque un écoulement de matière dans les directions axiale et circonférentielle. La pression de forgeage appliquée par le shoulder et le mélange des matériaux plastifiés donnent résultat à un joint solide.

La méthode est représentée par le schéma suivant :

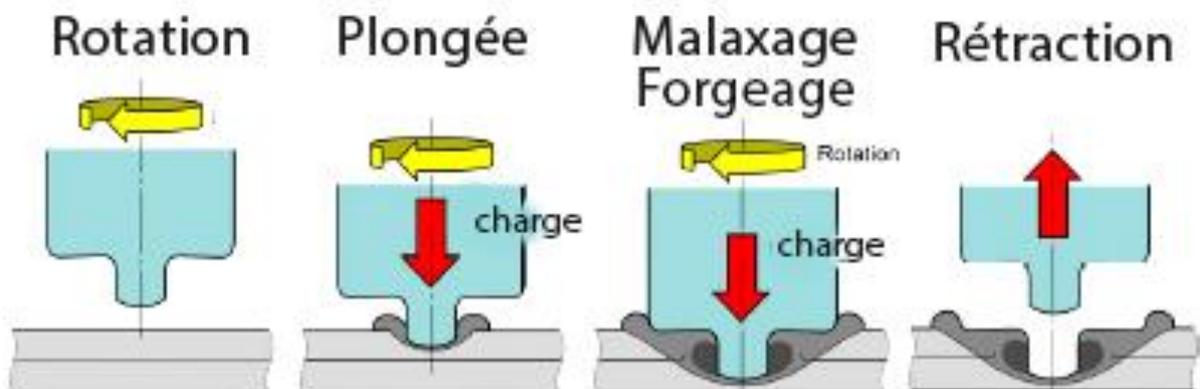


Figure 24: FSSW method Key Hole [20]

Refill FSSW

Dans cette méthode le trou laissé pour le processus de soudage est rebouché grâce aux mouvements relatifs du pin et du shoulder. L'opération se déroule en 3 étapes suivant le mouvement du shoulder et du pin : initiation, plongée totale, rétraction totale. Dans la phase d'initiation le pin et le shoulder sont mis en rotation afin de générer par friction la chaleur nécessaire à la phase de plongée. Dans la phase de plongée, le shoulder est plogné dans la tôle et le pin est rétracté. Dans la phase de rétraction le shoulder est rétracté jusqu'à la surface de la tôle et le pin est plongé jusqu'à la même surface afin de pousser la matière déplacée dans le shoulder dans l'espace laissé par ce dernier :

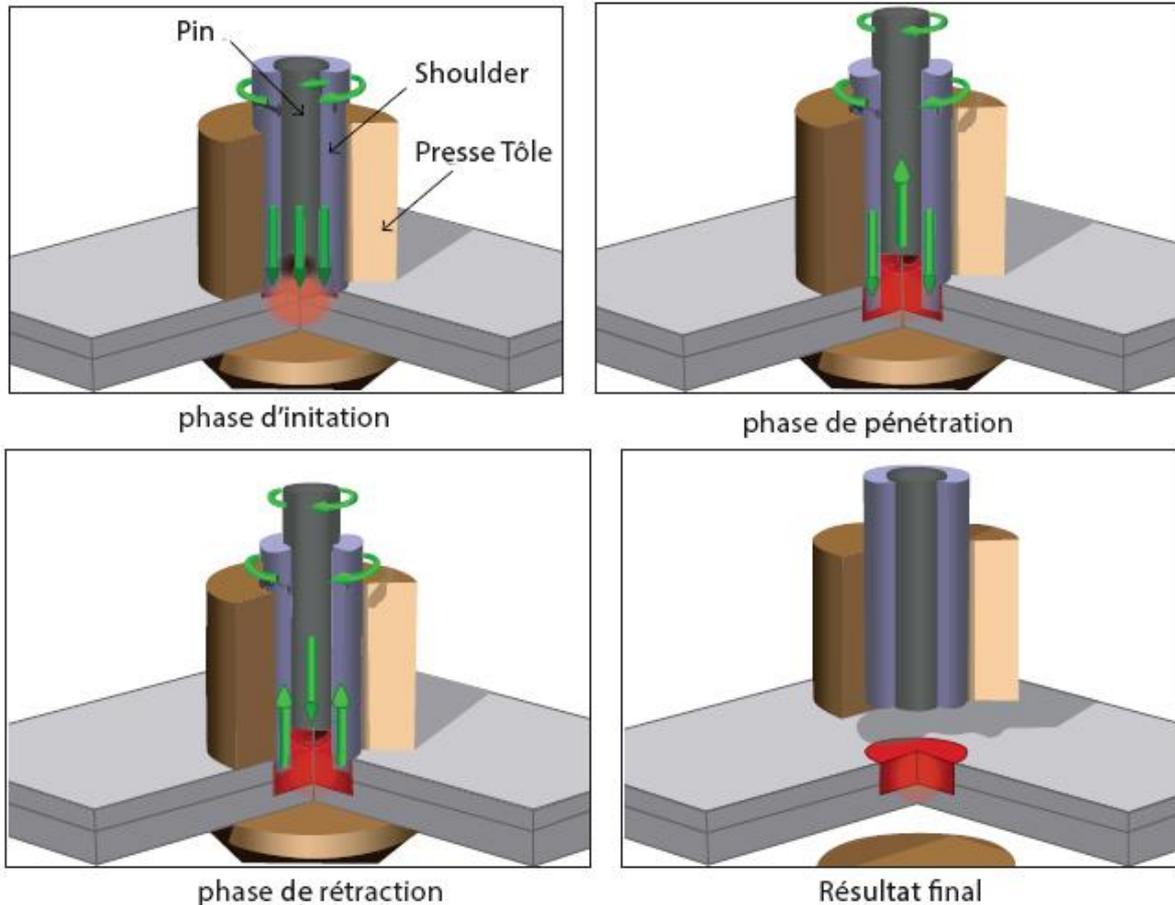


Figure 25: refill FSSW méthode 1 [21]

On peut procéder autrement afin d'obtenir le résultat en utilisant la technique nommée fixed position refill FSSW développée par le laboratoire « Advanced Materials Processing and Joining Laboratory of South Dakota School of Mines ». Au lieu de plonger le shoulder dans la Tôle, on plonge le pin comme il est montré dans la figure ci-dessous. Durant la phase 1 le pin et le shoulder en rotation bougent en direction de la tôle. Durant la phase 2 le pin pénètre la tôle à la profondeur désirée remplissant l'espace laissé par le shoulder par la matière déplacée. Ensuite le pin est rétracté et le shoulder se déplace dans le sens opposé afin de remettre la matière dans le vide laissé. Dans la dernière phase le shoulder et le pin sont rétractés après un certain temps.

On privilégiera cette méthode dans la conception de notre machine.

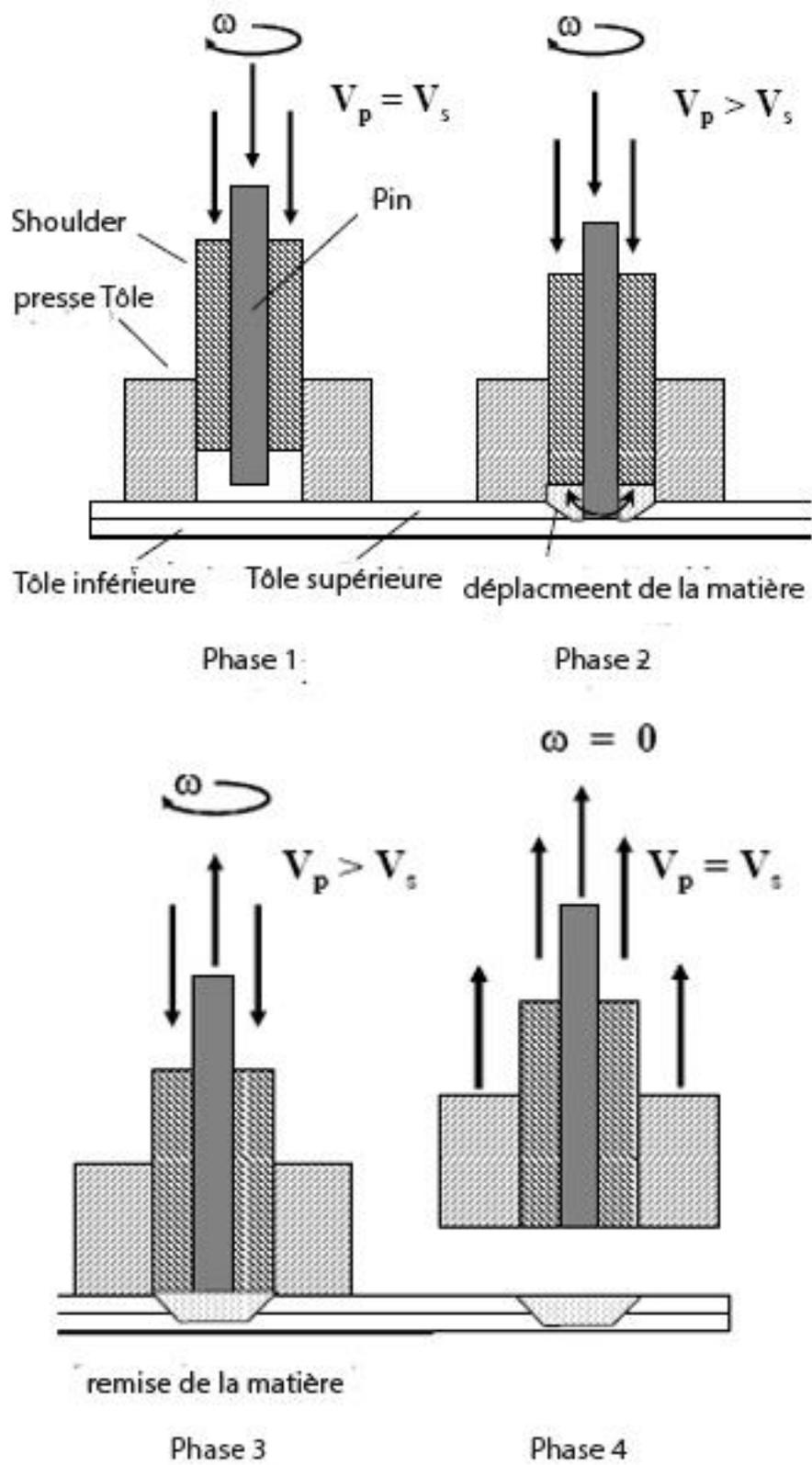


Figure 26: refill FSSW méthode 2 [22]

Stitch FSSW

Dans cette variante l'outil se déplace horizontalement sur une petite distance dans la tôle après la pénétration avant de se rétracter comme illustré dans la figure suivante :

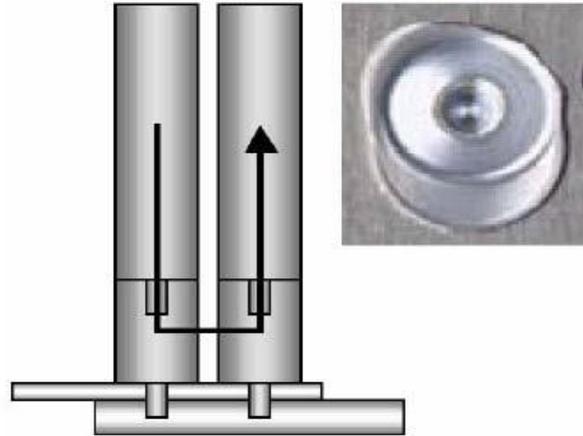


Figure 27: Stitch FSSW

Le but ici est de produire une surface de jointure plus importante pour une plus grande résistance.

Swing FSSW

Cette méthode a été développée à partir de la FSW par Hitachi avec l'idée de produire un cordon de soudure avec un rayon assez large. Après la pénétration l'outil monte un peu mais ceci est négligeable puisque il pivote avec un grand rayon et un petit angle de rotation. Ce mouvement nous donne un matériau comprimé situé à la fin de la soudure.

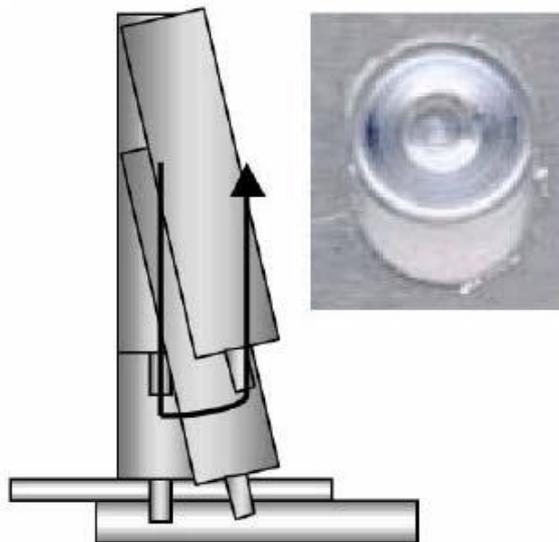


Figure 28: switch FSSW

III.2. Avantages et inconvénients de la FSSW par rapport aux méthodes classiques

La FSSW est utilisée dans de nombreux domaines, elle présente un certain nombre d'avantages comparés aux méthodes classiques telles que la RSW comme démontré par Mazda lors de sa production de la RX-8 ou :

- Une forte résistance des joints de soudure sans porosité, fissures ou contamination du métal, il n'y a pas de fusion durant la FSSW.
- Une consommation d'énergie moins importante, vu que pour la FSSW on n'a besoin d'énergie électrique que pour la rotation et le déplacement de l'outil. La consommation d'énergie peut être réduite de 99% pour l'aluminium et de 80% pour les aciers relativement à la RSW.
- Equipement moins coûteux, environ 40% que ceux utilisés pour la RSW pour le soudage de l'aluminium. On n'a pas besoin d'une grande installation électrique, ajouté à cela les outils de FSSW sont non consommables.
- Pas d'émissions gazeuses, le procédé est respectueux de l'environnement.
- Pas de projection de soudures. Le bruit et les émissions de vapeur sont réduits.
- Déformation peu importante du métal de base vu que la FSSW est une méthode de soudage à l'état solide qui ne nécessite pas de fondre le métal de base, ce qui fait que les déformations sont beaucoup moins importantes que dans le cas de la RSW.
- Le processus est hautement répétable vue la nature simple du mécanisme de jointure et le peu de paramètres à prendre en considération.
- Maintenance moins importante vu que le matériel utilisé est moins important que pour le cas de la RSW.
- Pas de préparation nécessaire du métal de base comme le nettoyage de la surface, forage ou mise en place de boulons ou rivets.
- Ne nécessite pas de formation spécialisée pour l'usage.
- Possibilité de soudage hétérogène.

En revanche la méthode présente certains inconvénients :

- La soudure par friction reste limitée à des géométries simples.
- Les matériaux soudés ne doivent pas avoir la propriété d'être lubrifiés à sec, les matériaux contenant : du graphite, sulfure de fer, plomb tels que les fontes frises, bronze, laiton ne peuvent pas être soudés suivant ce procédé [23] [24]

Processus du soudage

Le Pin en rotation est plongé dans le matériau pendant un certain temps (temps de soudage) afin de générer de la chaleur par friction. Une force axiale est appliquée tout au long du processus. Une déformation plastique se produit dans le matériau chauffé et ramolli adjacent au

pin tandis que le shoulder exerce une forte compression, ce qui nous donne un joint solide entre les deux tôles superposées.

Durant le processus, dès que l'outil en rotation entre en contact avec la surface du matériau à souder, la force axiale augmente jusqu'à une valeur prédéterminée. Après le maintien d'une force de soudage et d'une vitesse de rotation stables pendant un certain temps l'outil est retiré. Ceci est démontré dans la figure suivante :

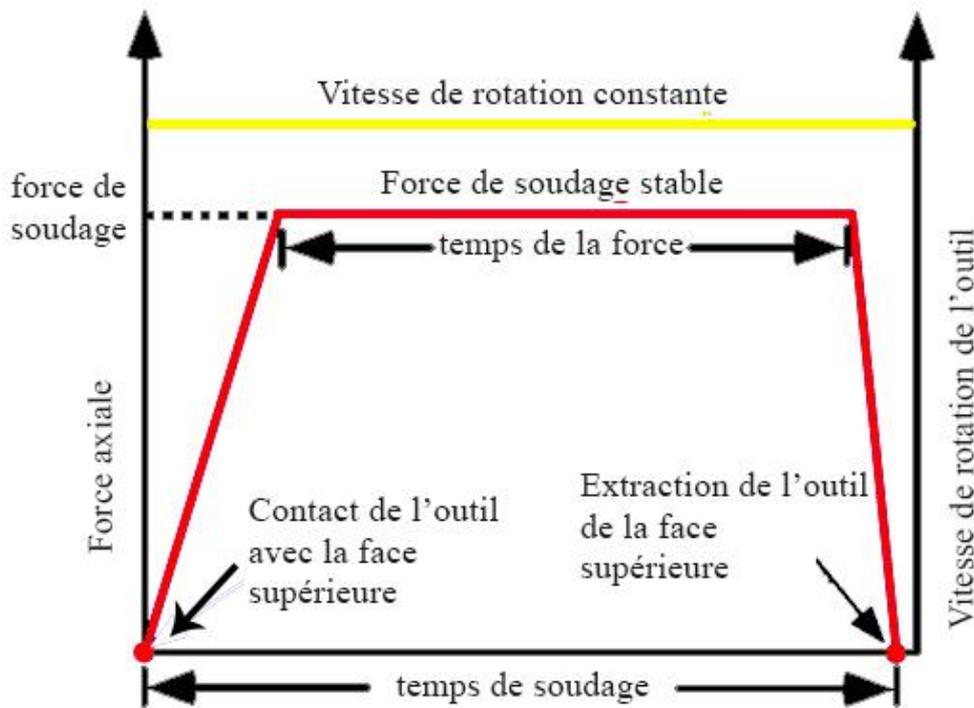


Figure 29: Processus de soudage FSSW [25]

Le temps de soudage est la période entre le contact et l'extraction de l'outil de soudage, du moment où le pin est en contact avec le matériau jusqu'à son extraction. Le temps de force est la période où la force de soudage est appliquée, du début de soudage jusqu'à l'extraction de l'outil. La vitesse de rotation reste constante durant tout le processus.

Paramètres du soudage

Les expériences menées en FSSW montrent que la qualité des joints de soudure est définie par un certain nombre de paramètres qu'on appellera paramètres d'entrée. Ces paramètres sont :

- Le temps de soudage.
- La vitesse de rotation de l'outil.
- Les forces axiales appliquées. Il faut préciser que celle-ci diffèrent pendant le processus de soudage, la force axiale appliquée pendant le forgeage est plus importante que celle appliquée pendant la friction.

La géométrie de l'outil joue un rôle aussi dans la qualité de la soudure.

L'influence de ces paramètres sera montrée à travers les diverses recherches et expériences menées dans le domaine de la FSSW. On se basera sur ces résultats dans le développement de notre outil.

III.3. Revue des Expériences menées dans le domaine

Dans cette partie nous allons exposer quelques études menées dans le domaine de la FSSW afin de montrer l'influence des paramètres de soudage :

III.3.1 Étude sur les propriétés statiques des points de soudure par Schilling et al. (2000)

Dans une publication par Schilling et al., (2000) « a preliminary investigation on the static properties of friction stir spot welds », des soudures de différents diamètres ont été réalisées : 6mm , 7mm, 10mm. Les soudures ont été réalisées sur des tôles superposées de différentes configurations. Les spécimens ont été classés par groupe suivant la combinaison épaisseur de la tôle/diamètre du point de soudure. Le tableau suivant classe ces groupes (de A à J) [26]

Tableau 1: spécimens D'après Schilling et al., 2000 [26]

configuration	Diamètre du point de soudure		
	6mm	7mm	10mm
1mm/3mm	A	B	C
1.5mm/3mm	D	E	F
2mm/3mm		G	H
3mm/3mm		I	J

Le métal de base utilisé est l'alliage d'Aluminium 6061-T4, pour les deux tôles. L'article ne mentionne pas la géométrie de l'outil ou les paramètres de soudure. Des essais de dureté et de résistance au cisaillement ont été conduits.

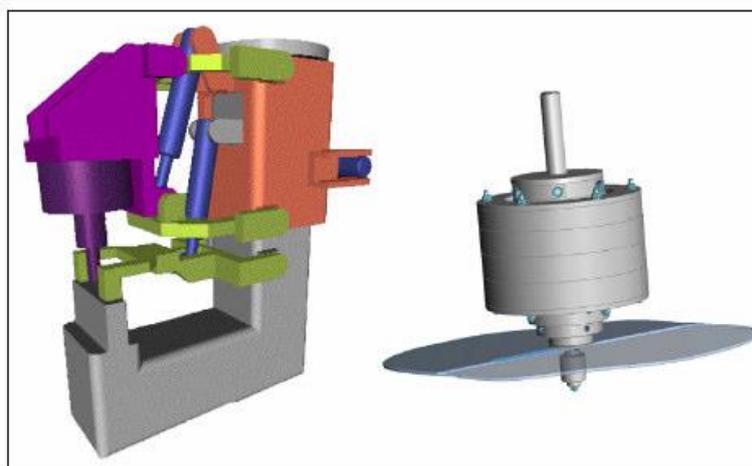


Figure 30: machine d'essai D'après Schilling et al., 2000 [26]

On fait plusieurs soudures adjacentes afin de produire la même surface de soudure qu'un processus de soudure par résistance et ceci pour des fins de comparaison.

$$L = \frac{\pi D^2}{4d} \text{ mm} + 2.5 \text{ mm}$$

where:

L = "Spot Length"

D = Spot Diameter (conventional)

d = Pin Diameter

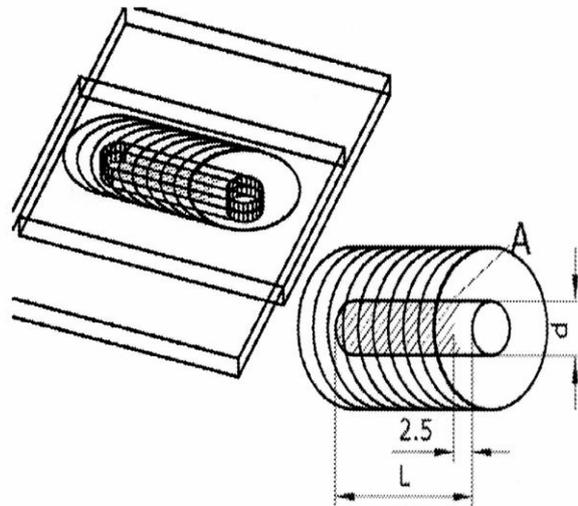


Figure 31: méthode de soudage D'après Schilling et al., 2000 [26]

3 essais de cisaillement ont été réalisés pour chaque diamètre de point de soudure. Les résultats montrent une soudure homogène et un comportement consistant du joint de soudure. L'apport additionnel de chaleur requis pour les grandes épaisseurs provoque une diminution de la résistance des joints, ceci est dû à la réduction de la zone affectée thermiquement des plaques 3/3 aux plaques de 1/3. On rapporte une plus grande résistance au cisaillement par ce procédé que celles obtenues par la RSW. Un résultat similaire a été obtenu par Sakano *et al.*, 2001 comme le démontre le tableau suivant :

Tableau 2: comparaison de la résistance aux cisaillement entre RSW et FSSW [27]

	Epaisseurs des plaques	UTSS	UTS
RSW	0.8/0.9	1.488 kN	0.799 kN
	1.0/0.9	1.811 kN	0.922 kN
FSSW	0.8/0.9	1.844 kN	0.892 kN
	1.0/0.9	2.017 kN	0.998 kN

On peut observer sur la figure suivante que l'augmentation de la taille des joints de soudure provoque une augmentation de la résistance au cisaillement.

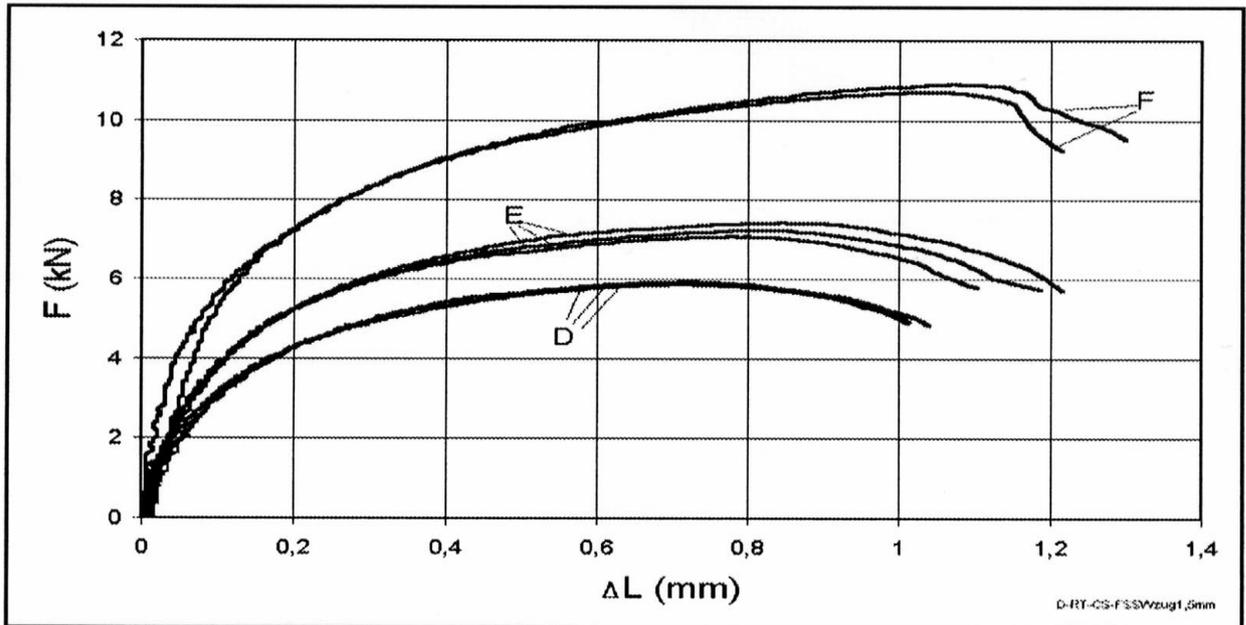


Figure 32: résistance au cisaillement en fonction de la taille du joint de soudure [26]

Tous ces tests ont été conduits sur la configuration 1.5mm/3mm.

Pour ce qu'il en est des combinaisons d'épaisseur, la combinaison 1mm/3mm est celle qui à le moins donné satisfaction, les autres configurations étant très proches comme le montre la figure suivante :

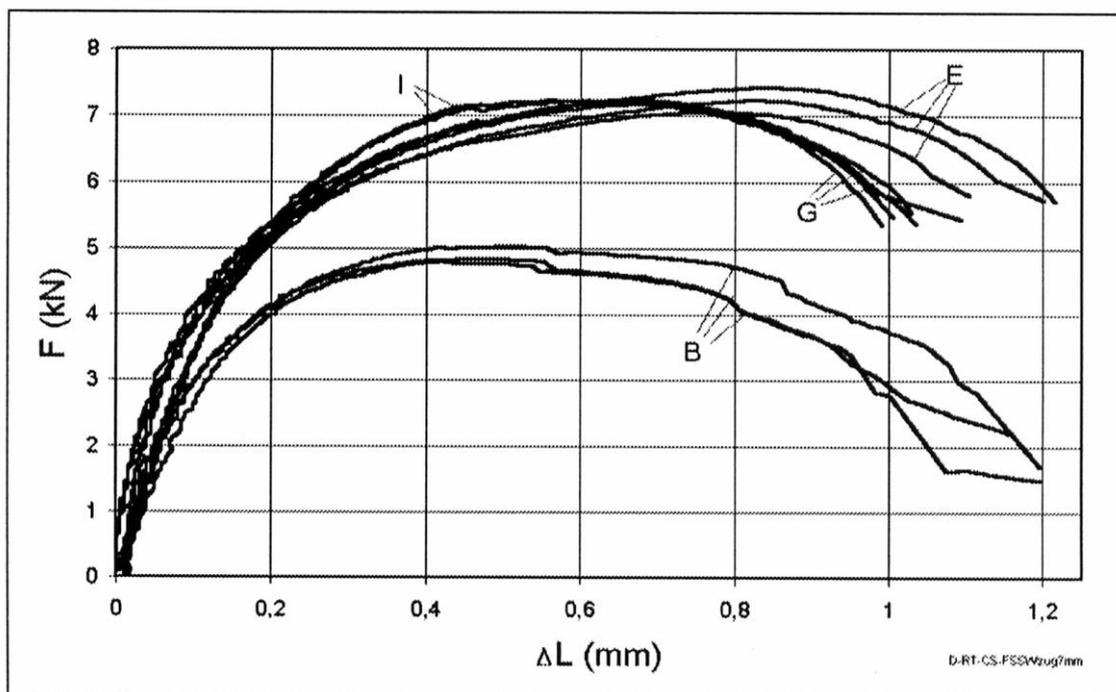


Figure 33: résistance au cisaillement en fonction de l'épaisseur des tôles [26]

Pour les essais de dureté, les joints de soudures de diamètre 7mm ont été choisis. La dureté a été calculée au milieu de l'épaisseur de la plaque supérieure et à 0.5 mm de la surface de la plaque inférieure pour les différentes configurations. Une baisse de dureté a été remarquée dans la zone affectée thermiquement. Les valeurs sont données en pourcentage de dureté de du métal de base pour les différentes configurations :

- 1mm/3mm : 86%
- 1.5mm/3mm : 82%
- 2mm/3mm : 79%
- 3mm/3mm : 69%

Le meilleur rendement a été obtenu pour les plus petites combinaisons – 1mm/3mm. Ceci est dû à un apport de chaleur moins important combiné à un pin plus court.

Sur la figure suivante on remarque que la tôle supérieure est plus attendrie que la tôle inférieure. Ceci est dû au fait qu'elle soit en contact direct avec le shoulder qui génère une grande quantité de la chaleur apportée pendant le processus.

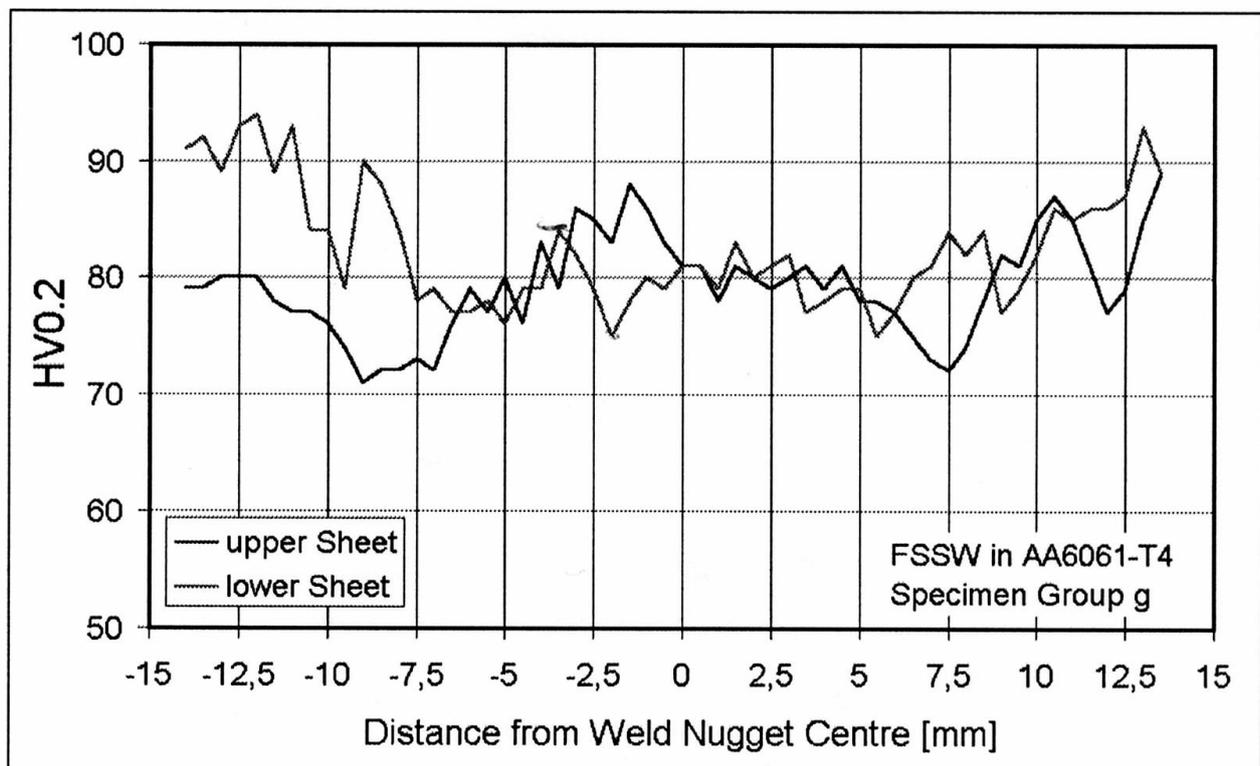


Figure 34: dureté en fonction de la distance du centre du joint de soudure [26]

III.3.2. Influence des paramètres d'entrée sur la microstructure et la résistance au cisaillement sur les soudures d'aluminium 5042 en suivant la méthode refill FSSW

METHODE DE SOUDAGE EMPLOYEE

Dans cette étude, on utilise des tôles d'aluminium AA5042-O d'une épaisseur 1.5mm, les soudures sont réalisées dans une configuration superposée en utilisant la méthode refill FSSW précédemment expliquée.

Les soudures ont été réalisées à l'aide d'une machine capable d'appliquer des forces axiales allant jusqu'à 15 kN avec une vitesse de rotation maximale de 300 tr/min. l'outil est composé de 3 parties un anneau presse tôle d'un diamètre de 18mm, un shoulder fileté de 9mm de diamètre, et enfin un pin rainuré d'un diamètre de 5.2 mm comme le montre la figure suivante :

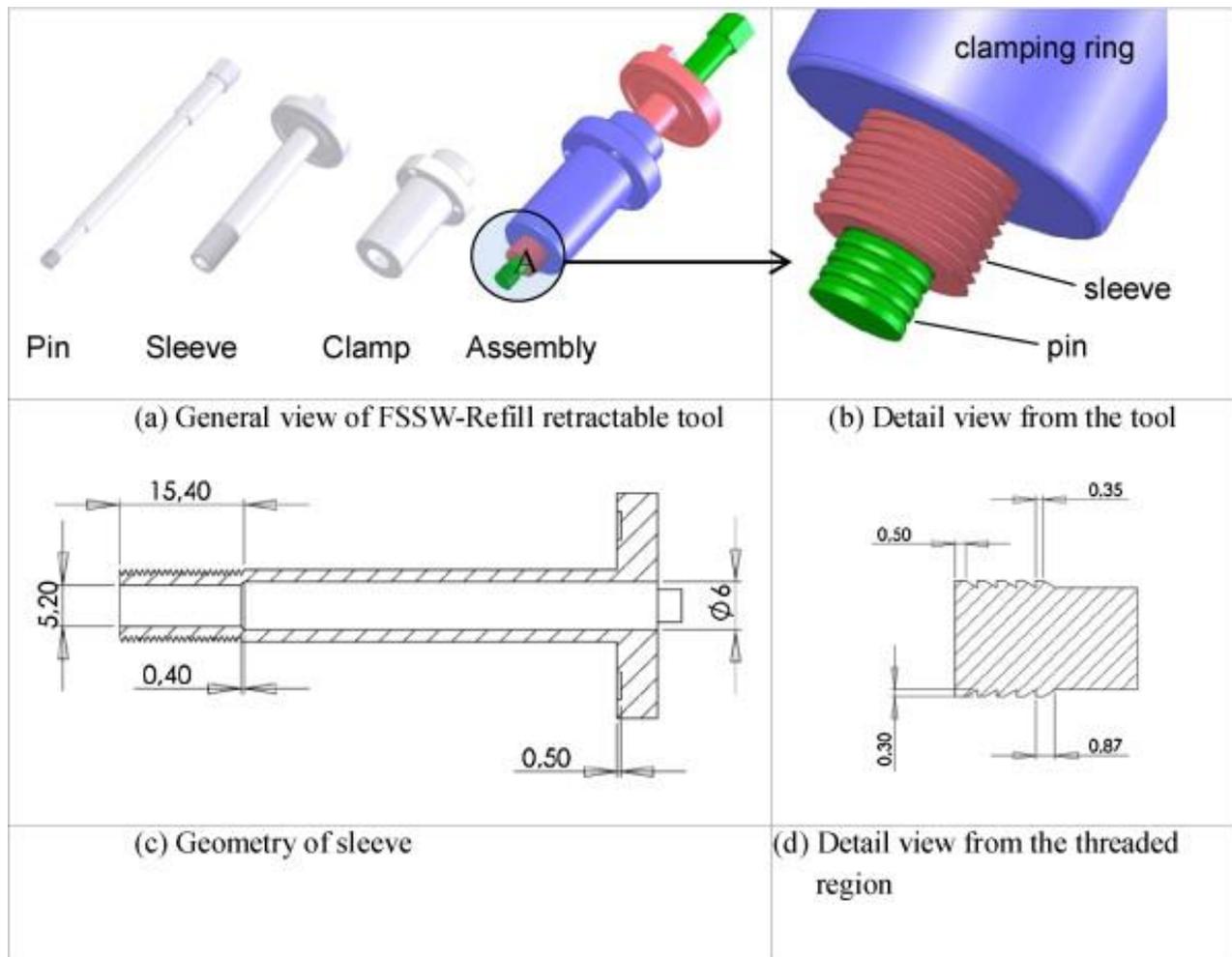


Figure 35: design outil de Zhao [29]

Toutes ces pièces peuvent bouger axialement d'une façon totalement indépendantes.

Le pin est le shoulder sont filetés afin d'améliorer la circulation du matériau fondu et d'éviter les formations de poches d'air comme le suggère l'étude menée par Zhao et al.2005. Les paramètres utilisés pour former les soudures sont listées dans le tableau suivant :

Tableau 3: paramètres du soudage pendant l'expérience.

Profondeur de pénétration du shoulder	1.45 mm ou 1.55 mm		
Vitesse de pénétration du shoulder	De 0.48 mm/s à 1.87 mm/s		
Vitesse de rotation du shoulder	900 tr/min	1400 tr/min	1900tr/min

DETAILS EXPERIMENTAUX

Les performances mécaniques des joints de soudure ont été testées par des essais de dureté et de cisaillement selon DIN EN ISO 14273 (2000) [30]. Ce procédé utilise une machine guidée par vis, Schenck Trebel RM100, commandée par un contrôleur Zwick avec une vitesse de déplacement de 2mm/min. des cales avec le même matériau et la même épaisseur que le métal de base ont été utilisées pour fixer les tôles.

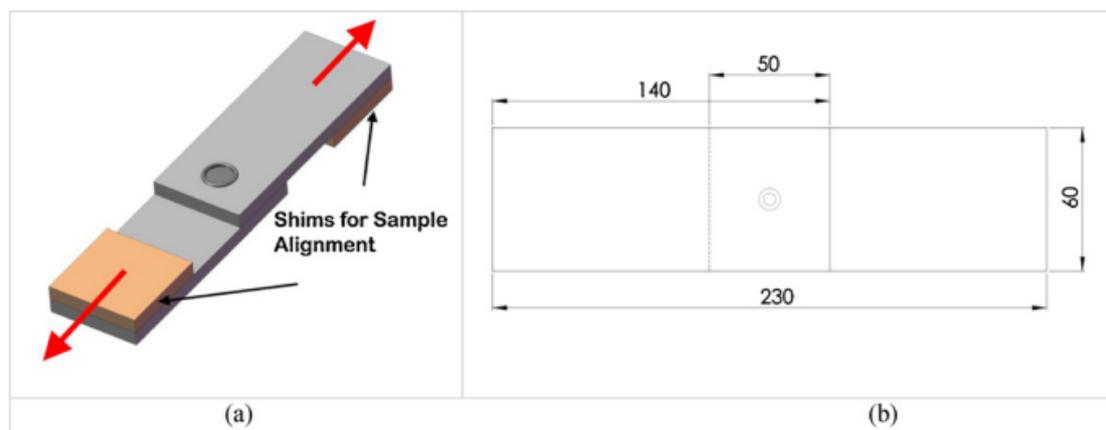


Figure 36: configuration de l'essai de soudage [31]

Afin d'avoir un cisaillement pur et d'éviter un réajustement initial durant les tests, les mécanismes de fissuration ont été établis avec la méthode SEM (erreur type), tandis que les microstructures ont été étudiées avec les méthodes SEM et OM. Les tôles ont été préparées suivant les procédures métallographiques standards et traitées avec une solution Kroll (96ml HNO₃ et 2 ml HF). Afin de mieux approcher l'influence des paramètres du processus de soudage le logiciel Statistica a été utilisé afin de donner une équation analytique pour reproduire et généraliser les données de l'expérience. Pour la simulation un intervalle de confiance de 95% a été utilisé. La variable dépendante était la charge de cisaillement maximale, tandis que les paramètres du processus étaient considérés comme des variables indépendantes.

RESULTATS

Le tableau suivant montre les performances mécaniques de la soudure à partir de en fonction de la charge de cisaillement de manière décroissante.

Tableau 4: performances mécaniques en fonction de la charge de cisaillement [31]

IN	VRO	PP	VP	VR	TP	TR	TT	BLL	CCE	SD	CCT	CCE/CCT
01	900	1.55	1.52	1.52	1.02	1.02	2.04	8.9	6.31	0.16	6.38	0.990
02	900	1.55	0.78	1.31	2.0	1.18	3.18	8.7	6.21	0.10	6.11	1.017
03	1400	1.55	1.87	1.87	0.83	0.83	1.66	8.2	6.13	0.24	6.18	0.991
04	900	1.55	0.52	1.16	3.0	1.34	4.34	8.5	6.07	0.08	6.06	1.004
05	1400	1.55	0.52	1.16	3.0	1.34	4.34	7.4	5.71	0.05	5.56	1.029
06	1400	1.55	0.78	1.31	2.0	1.18	3.18	7.4	5.41	0.11	5.62	0.964
07	1900	1.55	1.52	1.52	1.02	1.02	2.04	7.4	5.26	0.07	5.03	1.047
08	1400	1.45	0.48	1.08	3.0	1.34	4.34	7.2	5.19	0.22	5.15	1.000
09	1900	1.55	0.52	1.16	3.0	1.34	4.34	6	4.73	0.11	4.71	1.006
10	1900	1.55	0.78	1.31	2.0	1.18	3.18	6.5	4.53	1.18	4.76	0.952

VRO : vitesse de rotation de l'outil, PP : profondeur de pénétration (mm), VP : vitesse de pénétration (mm/s), VR : vitesse de rétraction (mm/s), TP : temps de pénétration (s), TT : temps total (s), DS : déviation standard, CCE : charge de cisaillement expérimentale, CCT : charge de cisaillement théorique.

Il apparait que la vitesse de pénétration n'est pas très importante dans le processus de refill FSSW de l'AA5042 puisqu'on trouve des soudures avec la même vitesse de pénétration mais qui présentent un comportement mécanique totalement différent par exemple les essais 2 et 10 ou 4 et 9. Cependant la vitesse de rotation de l'outil joue un rôle important dans le comportement mécanique des joints de soudure. Les vitesses plus lentes (900 tr/min) donnent la plus grande résistance au cisaillement tandis que les vitesses les plus grandes (1900 tr/min) donnent les plus mauvais résultats.

L'étude s'intéresse à la corrélation de l'apport énergétique de l'opération, puisque il est directement lié à la vitesse de rotation de l'outil. En supposant que toute l'énergie mécanique appliquée durant le processus se transforme en énergie thermique, SU et AL.(2006) [32] a proposé l'équation suivante pour décrire le processus :

$$Q_{app} = \sum_{n=1}^n F(X_n - X_{n-1}) + \sum_{n=1}^n T\omega\Delta t \quad (1)$$

Cette équation montre que l'apport d'énergie thermique a deux composantes, la première représente l'apport d'énergie engendré par le déplacement vertical de l'outil, tandis que la seconde représente l'apport d'énergie dû à la rotation.

La force F est appliquée durant le déplacement vertical de l'outil, x représente la profondeur de pénétration, T représente le moment de torsion associé à la rotation de l'outil, ω représente la vitesse angulaire (rad/s). Δt représente l'incrément du temps de processus. Pour chaque incrément les valeurs de F, ω et T peuvent changer en fonction de n.

Su et al.(2006) rapporte pour des essais de FSSW sur AA6061-T6, l'apport d'énergie dû à la friction est 200 fois supérieur à celui du aux charges axiales, ce qui nous permet d'éliminer celles-ci dans l'équation d'énergie. Ceci nous donne l'équation (2)

$$Q_{app} = \sum_{n=1}^n T\omega\Delta t \quad (2)$$

Il est supposé que quand la vitesse de rotation ω augmente T diminue à cause de la réduction de viscosité du matériau associée à une température plus élevée. Dans une approche simpliste on pourrait supposer le produit ωT pratiquement constant ce qui suggère que la variable principale affectant l'apport d'énergie durant le processus est le temps de ce dernier. Cependant le tableau XXX montre qu'on peut obtenir des résultats différents pour un même temps de soudure, éprouvettes 04 et 09 (haute et basse résistance au cisaillement). Ceci suggère que ωT n'est pas constant ou que l'apport énergétique n'a pas de grande importance durant le processus.

ANALYSE STATISTIQUE

Une analyse préliminaire des résultats a montré qu'il n'y a pas raison de traiter les variables : temps de pénétration (TP) et temps de rétraction (TR) comme deux variables distinctes et indépendantes, alors elles ont été additionnées comme « temps total - TT ». En outre, la vitesse de rétraction (TR) a montré une faible influence sur la charge de cisaillement des connexions d'où son élimination de l'analyse. L'équation suivante présente la Corrélation des variables du processus à la charge de cisaillement maximale avec $R = 0,973$:

$$\begin{aligned} \text{ShL} = & C_1 + C_2 \left(\frac{\text{RPM}}{900} \right)^{2.5} + C_3 \left(\frac{\text{PD}}{1.45} \right) \\ & + C_4 \left(\frac{\text{PD}}{1.45} \right)^2 + C_5 \frac{(\text{PD}/1.45)}{(\text{TT}/1.66)^3} \end{aligned} \quad \text{Eq. (3)}$$

Avec SHL : charge de cisaillement maximale (kN), RPM : vitesse de rotation de l'outil, PD : profondeur de pénétration, TT : temps total du processus.

De nouvelles simulations ont été faites afin de simplifier cette équation ce qui nous conduit à :

$$\text{ShL} = C_1 \left(\frac{\text{RPM}}{900} \right)^{2.5} + C_2 \left(\frac{\text{PD}}{1.45} \right) + C_3 \frac{(\text{PD}/1.45)}{(\text{TT}/1.66)^3} \quad \text{Eq. (4)}$$

Les coefficients pour cette équation sont les suivants : $C_1 = -0,246$; $C_2 = 5,86$; $C_3 = -0,621$. La valeur élevée de C_2 que l'effet de la profondeur de plongée domine la valeur de ShL.

Pour étudier l'influence des variables sur la charge de cisaillement, chaque variable a été retirée de l'équation et l'équation de corrélation comparé comme indiqué dans le tableau suivant :

Equation	R
Eq. (4)	0.973
Eq. (4) - $C_1(\text{RPM}/900)^{2.5}$	0.409
Eq. (4) - $C_2(\text{PD}/1.45)$	0.000
Eq. (4) - $(\text{TT}/1.66)$	0.914

ANALYSE MICROSTRUCTURELLE

La figure a montré une vue en coupe horizontale de l'éprouvette numéro 4 (6.07 kN), réalisée à 900 tr/min, on y voit le métal de base BM, la zone de malaxage SZ ainsi que la zone thermo-mécaniquement affectée TMAZ, d'après Olea et al (2007)[33], en FSW TMAZ et SZ sont soumises à la chaleur et aux déformations plastiques, mais dans SZ, une recristallisation dynamique se produit, ce qui n'est pas le cas dans TMAZ.

La figure présente une vue détaillée de la région supérieure du joint de soudure montrant un défaut volumétrique, alors que le digramme représente le profil de dureté réalisé au milieu de la tôle supérieure. On remarque une légère augmentation de la dureté dans SZ.

La figure représente la microstructure d'un joint hautement résistant, l'éclair sur le dessus délimite le diamètre du shoulder (9mm), il est possible d'observer une interface linéaire entre les deux tôles. La figure b montre une fracture de sortie tandis que la figure c représente un agrandissement de l'extrémité inférieure du joint de soudure. L'Interface large suggère un bon mélange de matière dans cette région. Figure. 7a montre la coupe transversale d'une soudure à

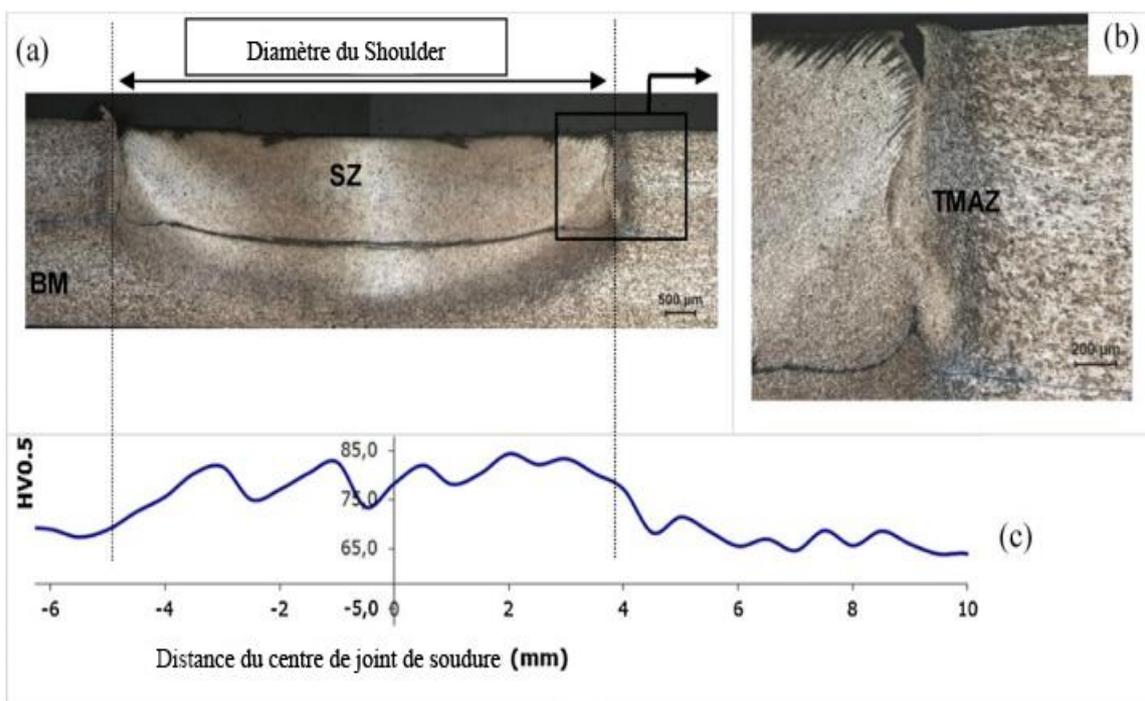


Figure 37: microstructure et dureté [31]

Faible résistance (spécimen10 à 4,53 kN). Un plus fort grossissement de l'interface l'extrémité inférieure de l'articulation est présentée, ce qui suggère un écoulement de matière envers la surface. Les fractures présentées dans la figure xxx montre deux régions distinctes : l'une située dans le centre de la soudure et l'autre dans le coin de la soudure. La figure xx représente des stries.

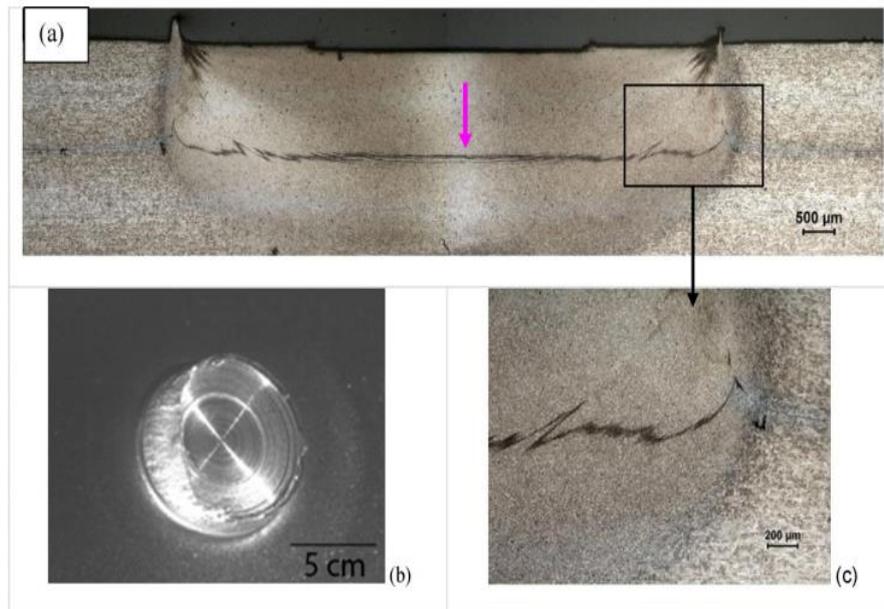


Figure 38: structure du joint de soudure. [31]

DISCUSSION

L'Eq. (2), dérivée pour le processus FSSW, ne parvient pas à prédire le comportement en cisaillement des joints de soudure. Pour améliorer l'équation, il est suggéré d'inclure un terme associé à la condition de contact à savoir, la condition de glissement ou de collage.

Eq. (3) et l'équation simplifiée. (4) ont pu corréliser les paramètres du processus à la charge de cisaillement maximale ($R = 0,973$). Le tableau 4 montre qu'après avoir supprimé la profondeur de plongée (PD) à partir de l'équation. (4), R est nul. Ce qui indique que la profondeur de pénétration est la variable la plus importante dans le processus. En outre, sans connaître la profondeur de pénétration, la charge de cisaillement maximale ne peut pas être prédite.

La vitesse de pénétration n'est pas présente dans l'équation. (3). Toutefois on doit souligner que l'impact de ce paramètre influe directement sur la charge de cisaillement maximum dans un temps donné.

Puisque l'Eq. (3) est développée uniquement pour les soudures AA5042, elle est désormais

Testée pour l'alliage AA7075 soudé avec le processus Refill FSSW effectué à HZG. Après les simulations il a été obtenu un $R = 0,913$. Ce tableau présente les résultats expérimentaux

Et théoriques de la charge de cisaillement de 23 soudures en utilisant différentes conditions.

Tableau 5: Resultats [31]

Essai	VRO	PP	TT	CCE	CCT	CCE/CCT
-------	-----	----	----	-----	-----	---------

01	1000	2.1	3.4	9.59	9.62	0.997
02	1400	2.1	3.4	8.88	9.52	0.932
03	1800	2.1	3.4	9.91	9.38	1.057
04	1000	2.1	5.4	10.32	10.54	0.980
05	1800	2.1	5.4	10.32	10.29	1.003
06	1000	2.1	7.4	10.56	10.72	0.985
07	1400	2.1	7.4	10.68	10.62	1.005
08	1800	2.1	7.4	10.91	10.48	1.041
09	1000	2.2	5.4	11.84	11.55	1.025
10	1400	2.2	5.4	11.49	11.45	1.003
11	1800	2.2	5.4	11.67	11.30	1.032
12	1000	2.2	7.4	12.22	11.75	1.040
13	1400	2.2	7.4	11.81	11.65	1.014
14	1800	2.2	7.4	11.06	11.50	0.962
15	1000	2.2	9.4	11.42	11.81	0.967
16	1400	2.2	9.4	11.80	11.71	1.007
17	1800	2.2	9.4	10.98	11.56	0.950
18	1400	2.3	7.4	10.81	10.71	1.009
19	1800	2.3	7.4	10.54	10.56	0.998
20	1000	2.3	9.4	10.97	10.87	1.009
21	1800	2.3	9.4	10.29	10.63	0.968
22	1400	2.3	11.4	10.91	10.80	1.010
23	1800	2.3	11.4	10.71	10.65	1.005

Ce résultat est en accord avec le travail communiqué par Tozaki et al. (2006) lors de l'étude de la limite élastique au cisaillement et à la résistance à la traction transversale du dissemblable FSSW entre 2017-T6 et 5052 alliages d'aluminium et par Merzoug et al. (2010) lors de l'étude de FSSW de l'alliage AA6060.

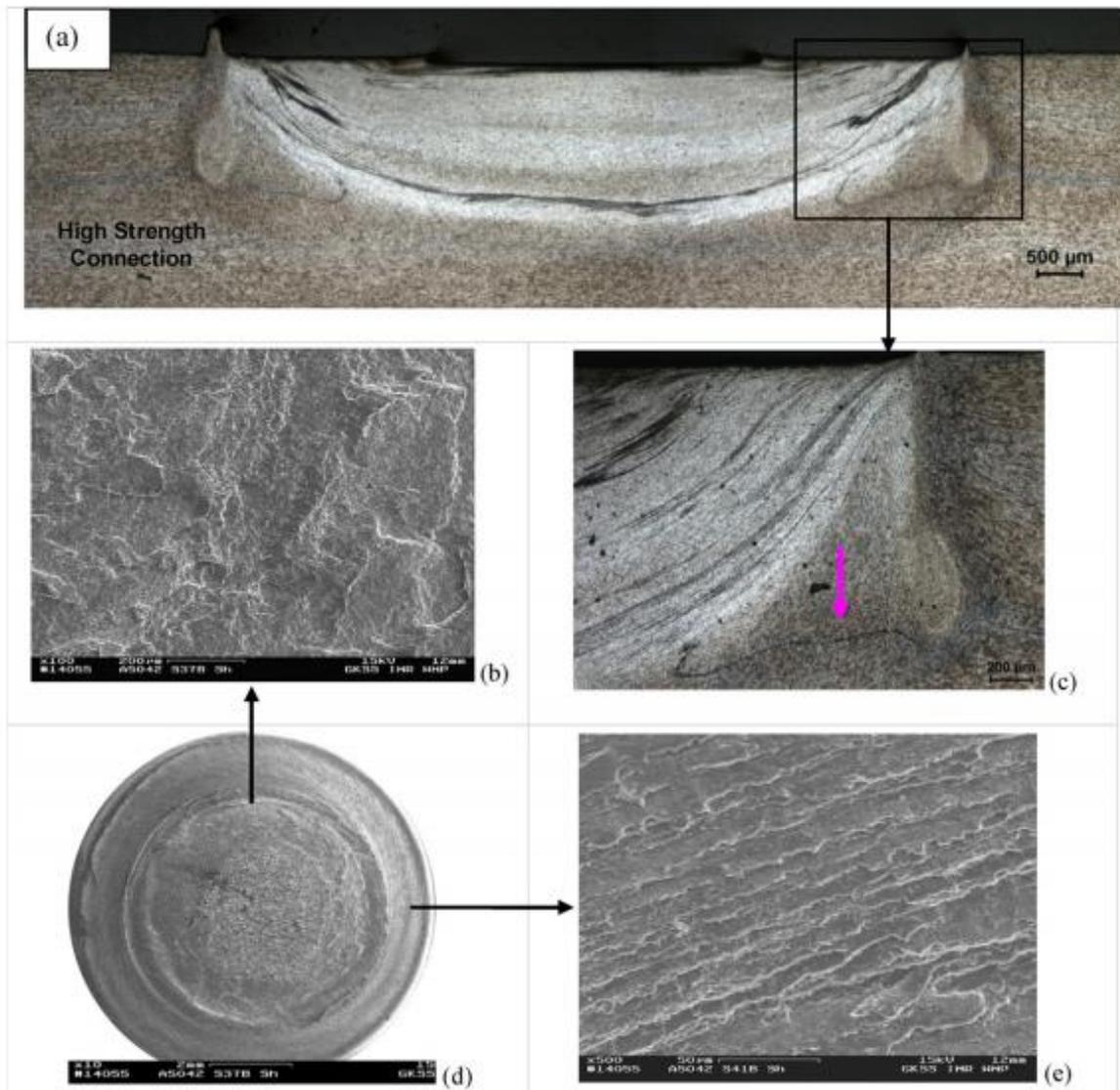


Figure 39: microstructure d'une soudure hautement résistante.

Bozzi et al. (2010) ont constaté que la résistance de soudure s'accroît de 1100 tr/min à 1300 tr/min et diminue après. Les mêmes résultats ont été constatés par Yuan et al. (2011) lors de l'étude de FSSW of AA6016. La charge du cisaillement s'est accrue de 1000 tr/min à 1500 tr/min et a diminué de 1500 tr/min à 2500 tr/min.

Les profils de dureté et les anomalies volumétriques ne peuvent pas expliquer la différence de performance pour la recharge de soudures FSSW étudiée dans le travail présent car les échantillons ont montré des profils de dureté similaires tandis que les défauts ont été observés dans les soudures de grande résistance et non pas celle de faible résistance.

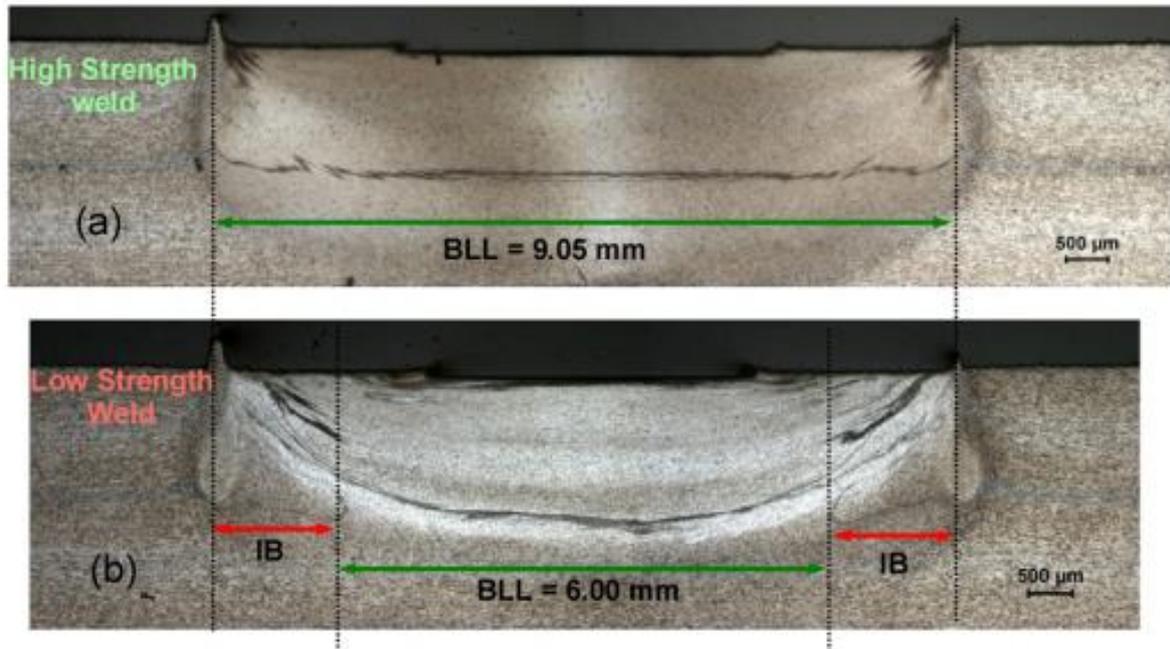


Figure 40: comparaison entre les zones de soudure [31]

L'accroissement de dureté observé dans le SZ peut être attribué à la réduction de la taille des grains. Le HAZ typique, généralement observé dans FSW et FSSW des alliages d'aluminium, qui est associé à une diminution considérable (ou légère) de la dureté, n'est pas observé dans la présente étude.

Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que l'AA5042 n'est pas un alliage à durcissement rapide. D'un point de vue technologique, ces profils de dureté sont importants car ils indiquent qu'il n'y a aucune dégradation de la résistance du matériau tout au long du processus.

BLL joue un rôle important dans la charge de cisaillement maximale. Afin d'appuyer cette assertion fig.8 représente un tracé BLL* résistance de la cisaille. Pour les soudures traitées à une vitesse de rotation de l'outil plus élevée (1900 tr/min), le flux du matériau est plus vertical (i.e., dans la direction de la surface de soudure) et a pour résultat la réduction de BLL. Ces résultats de recherches appuient les précédentes observations en littérature selon lesquelles une interface plus linéaire et parallèle améliore la longueur du ligament de liaison, ainsi rapporté par Kyffin et al. (2006) pour le FSSW de DP800 acier à haute résistance automotrice.

En outre, Freeney et al. (2006) suggère afin de garantir une performance de jointure que l'interface entre les plaques doit rester parallèle à la surface de la plaque. Ils ont constaté que pour les soudures faites à une vitesse de rotation de l'outil élevée (moindre résistance), l'interface de soudure se courbe vers le haut à l'extrémité extérieure de la zone de l'obturateur, tandis que pour les soudures faites à une vitesse de rotation de l'outil faible (résistance élevée), l'interface de la soudure est relativement plate. Plus encore, Ericsson et al. (2007), après avoir étudié l'épuisement des propriétés de AA6181 le mouvement de friction des soudures imbriquées, rapporte que l'état de tension est aggravé par la formation d'entailles du au flux verticale du matériau à l'extérieur du goujon.

CHAPITRE IV : CONCEPTION DE LA MACHINE FSSW

IV.1. Introduction :

Dans le but de pouvoir réaliser dans un temps court notre machine de FSSW, on a décidé d'adapter une perceuse colonne, non en fonctionnement, qui se trouve à l'atelier de soudure. Afin de minimiser le temps et le coût de la fabrication, certains organes de cette perceuse joueront le rôle de quelques sous-ensembles de notre future FSSW tels l'entraînement, en rotation et en translation du pin, par la broche.

On devra veiller à ne rien modifier dans la conception de la perceuse.

On devra répondre aux contraintes suivantes :

- Adapter la conception de la machine FSSW à la perceuse.
- Réduire au maximum les dimensions des différentes parties pour des soucis d'encombrement.
- Adapter la conception aux matériaux qui sont à notre disposition.
- S'assurer de la faisabilité de la conception.
- Faire en sorte que le shoulder et le pin aient un mouvement relatif à la fois en translation et en rotation et ceci afin de fermer le trou laissé par la soudure (refill FSSW) et d'éviter le collage des deux éléments de l'outil.
- Assurer un apport assez important au niveau des efforts axiaux en choisissant par la suite la meilleure solution en termes de vérins pneumatiques ou hydrauliques en comparant les avantages et inconvénients.
- Faire un choix correct des roulements.
- Dimensionner correctement les clavettes utilisées.
- Limiter la consommation d'énergie de la machine au maximum
- Faire un dimensionnement correct des éventuelles pompes ou moteur en faisant un calcul correct des forces mises en jeu.
- Assurer une bonne concentricité des différentes parties de la machine.
- Automatiser la commande de la machine pour une qualité de soudure optimale.
- Optimiser les paramètres de la machine pour répondre aux exigences de l'opération de soudage FSSW et afin de permettre des applications sur plusieurs matériaux.

IV.2. Présentation générale de la machine

Voici une vue générale de la machine de FSSW qu'on a conçu :

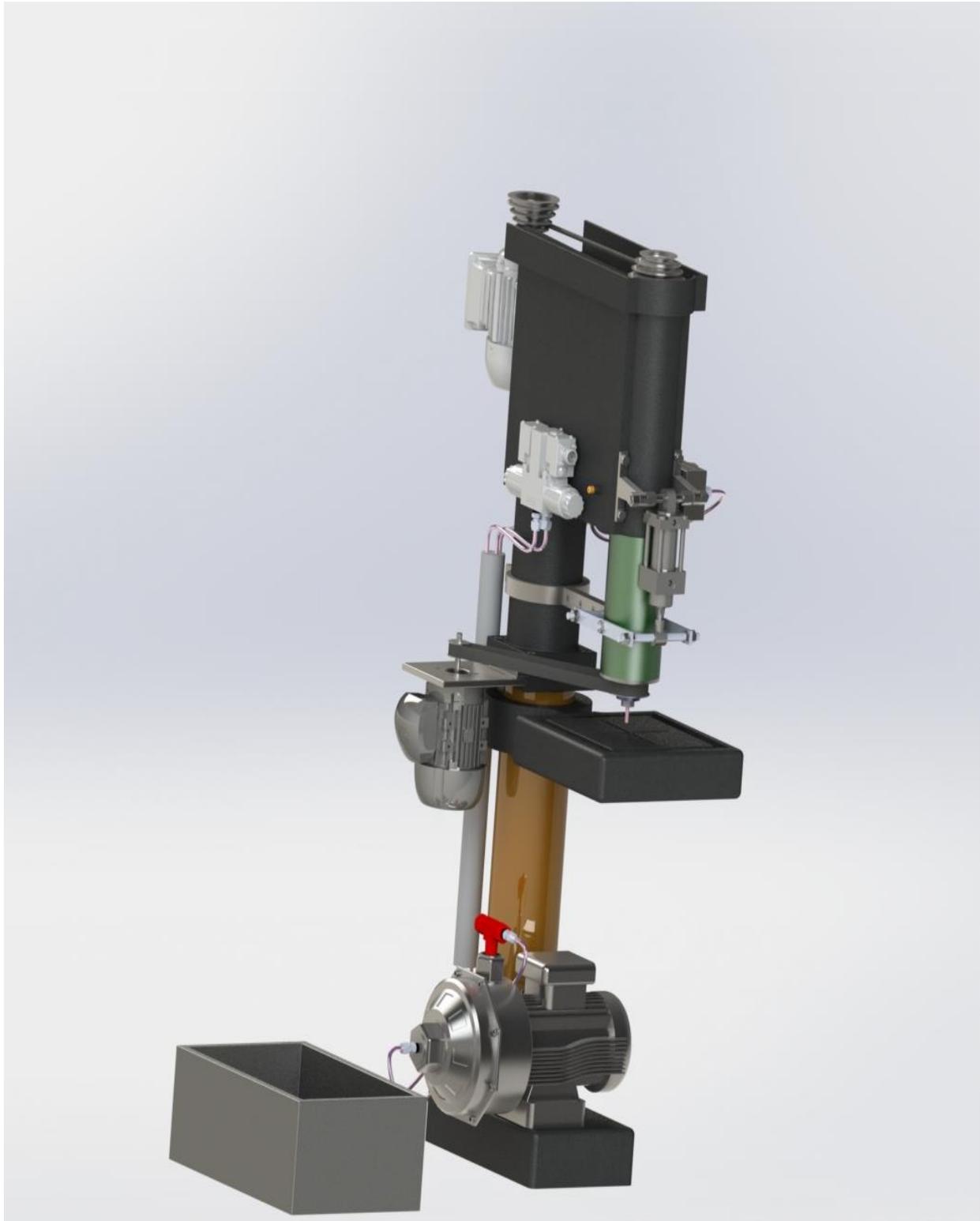


Figure 41: vue d'ensemble de la machine

a- Mouvement du pion :

Dans le but de faire un choix adéquat de la chaîne cinématique de notre machine tout en profitant de celle de la perceuse utilisée nous commencer par représenter la dernière dans la figure

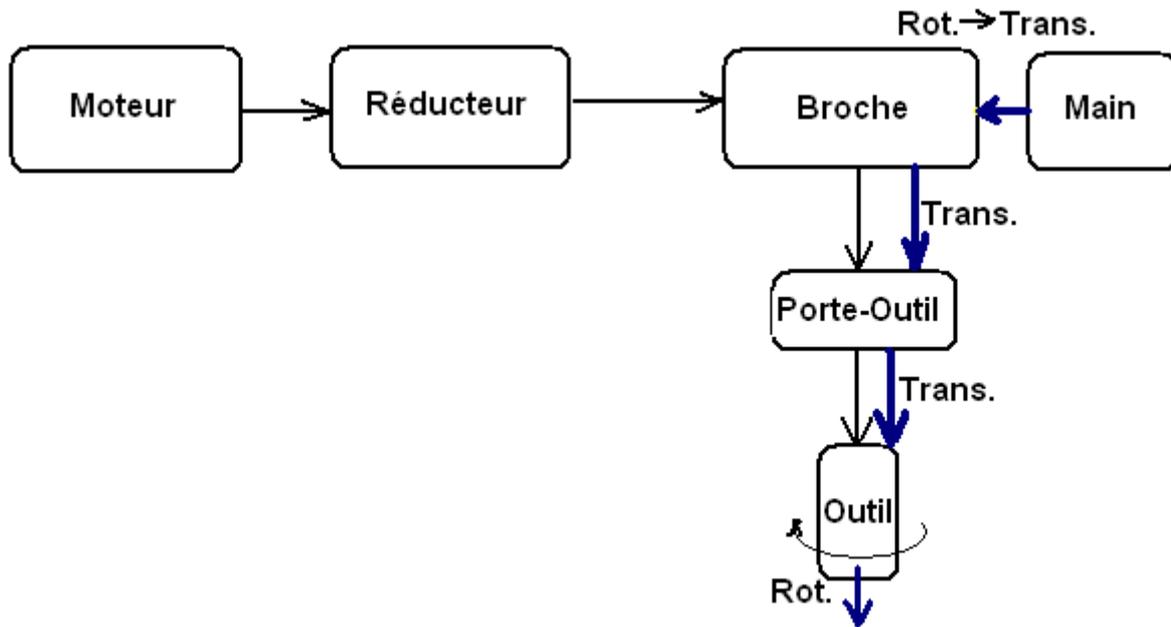


Figure 42: Schéma de la perceuse

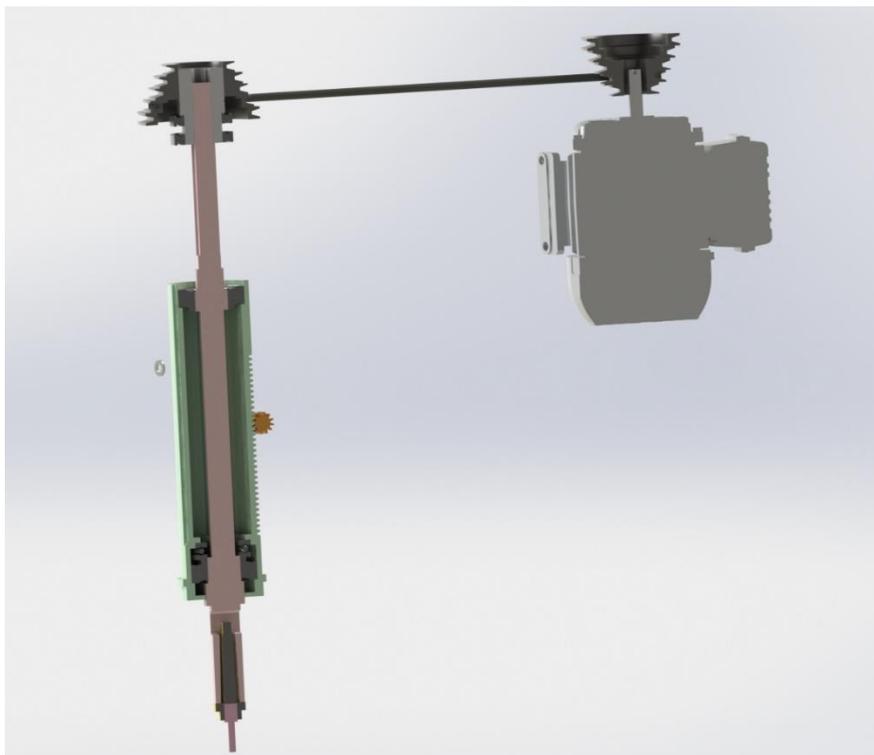


Figure 43: organes perceuse

L'utilisation intégrale de la chaîne cinématique de la perceuse pour entrainer le pion ne nous permettra pas de prendre des valeurs bien déterminées des paramètres de soudage. On a gardé la partie du mouvement de rotation sans la translation (manuelle) V. figure. 44

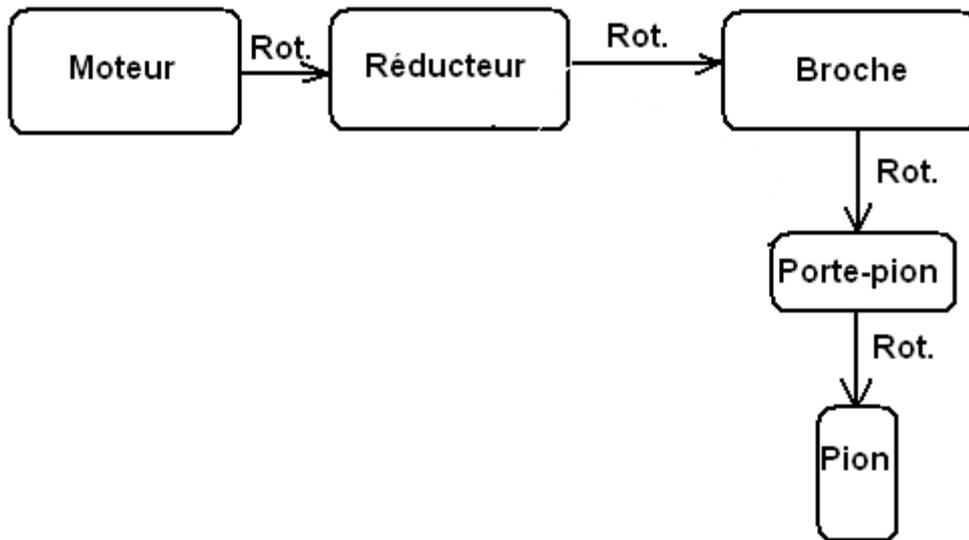


Figure 44: Partie rotation gardée de la perceuse

En ce qui concerne le mouvement de translation du pion on avait la possibilité d'utiliser un moteur électrique, un système de transformation du mouvement de rotation en un mouvement de translation (vis-écrou). Pour des raisons de complexité et d'encombrement on a opté pour l'entraînement avec un vérin rotatif et gardé le système pignon- crémaillère de la perceuse pour la transformation du mouvement de rotation en un mouvement de translation. Ce type de vérin transmet des couples importants. La nouvelle chaîne cinématique du pion est donc représentée par la figure 45

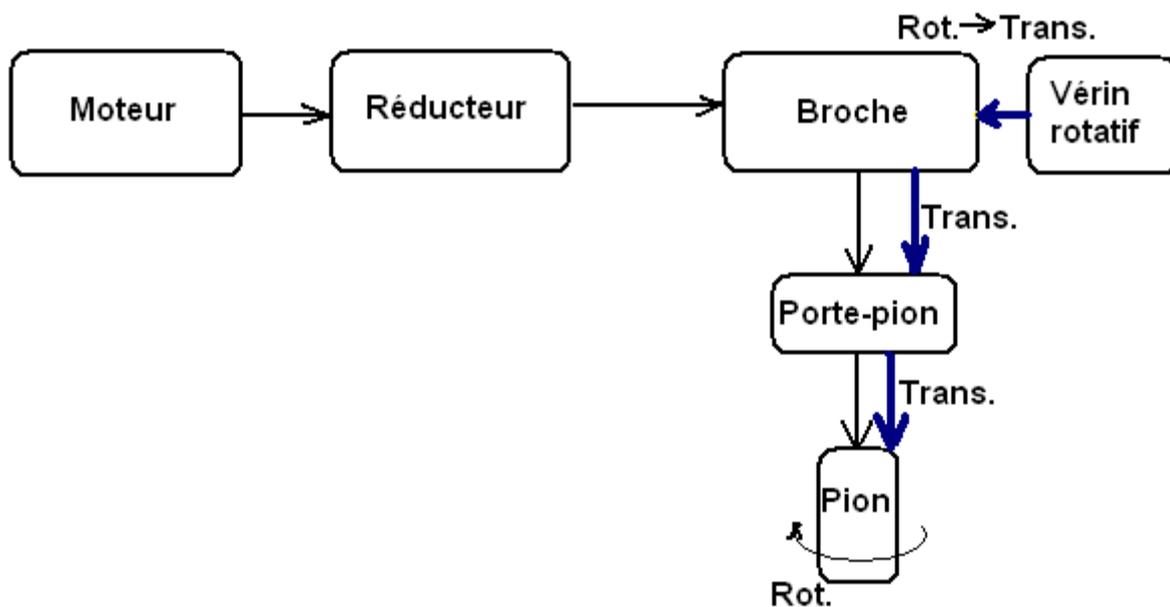


Figure 45: Schéma de la partie d'entraînement du pion.



Figure 46: modification du mouvement de translation de la perceuse

Nous présentons dans ce qui suit le schéma cinématique expliquant le fonctionnement de l'ensemble de la machine :

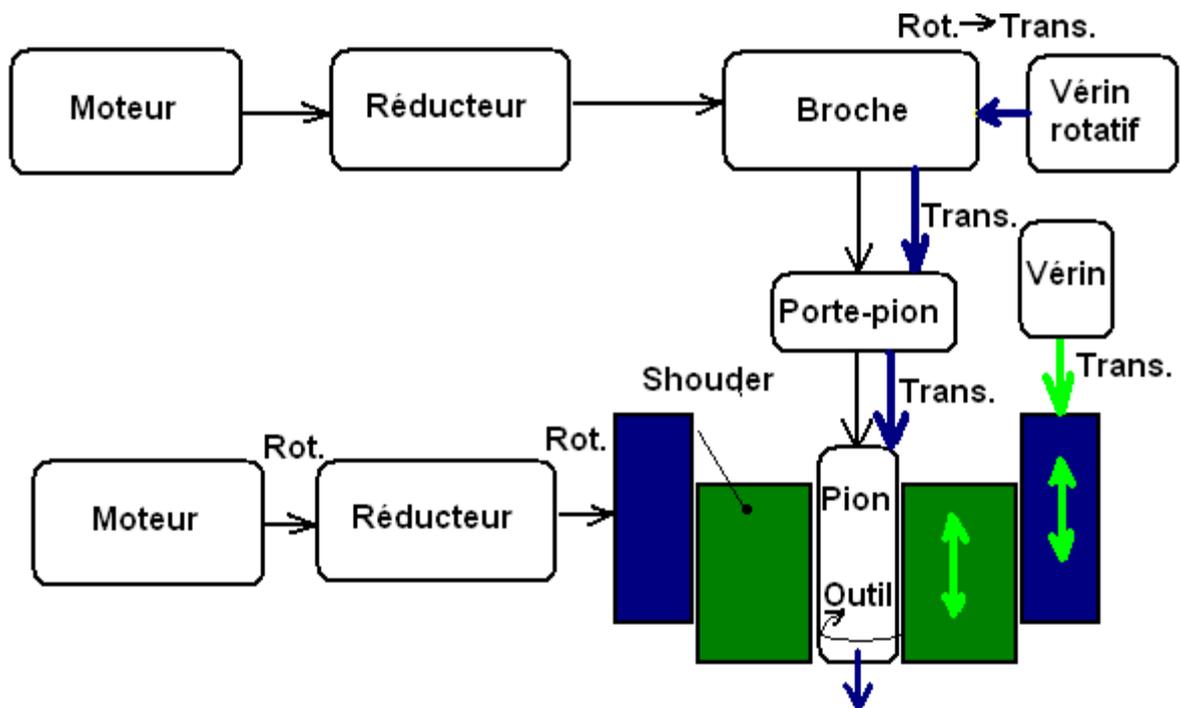


Figure 47: Schéma de la FSSW.



Figure 48: organes de la machine de FSSW

Sur la broche de la perceuse on adapte un porte pin et le pin en question,



Figure 49: porte pion

On peut voir sur la figure suivante le porte pin composé d'un cône morse afin de l'insérer dans la broche de la machine et d'un cylindre creux avec une rainure de clavette et un perçage afin de porter le pion et l'entraîner en rotation. Voici le pion, dont le rôle est de frotter contre la tôle afin de générer la chaleur nécessaire à la friction.



Figure 50: pion

Ce qui fait que le mouvement de rotation du pin sera assuré par le moteur de la perceuse tandis que son mouvement de translation sera assuré par un vérin rotatif qui remplacera le dispositif manuel initialement présent sur la machine, ceci pour à la fois générer les efforts nécessaires à la soudure et d'autre part assurer un bon contrôle des paramètres de soudage.

La seconde partie est composée de 3 parties :

Le shoulder est porté par deux pièces, l'une assure son déplacement axial, et l'autre sa rotation. Les pièces sont représentées ainsi que le shoulder sont représentées dans les pages suivantes :



Figure 51: Porte Shoulder

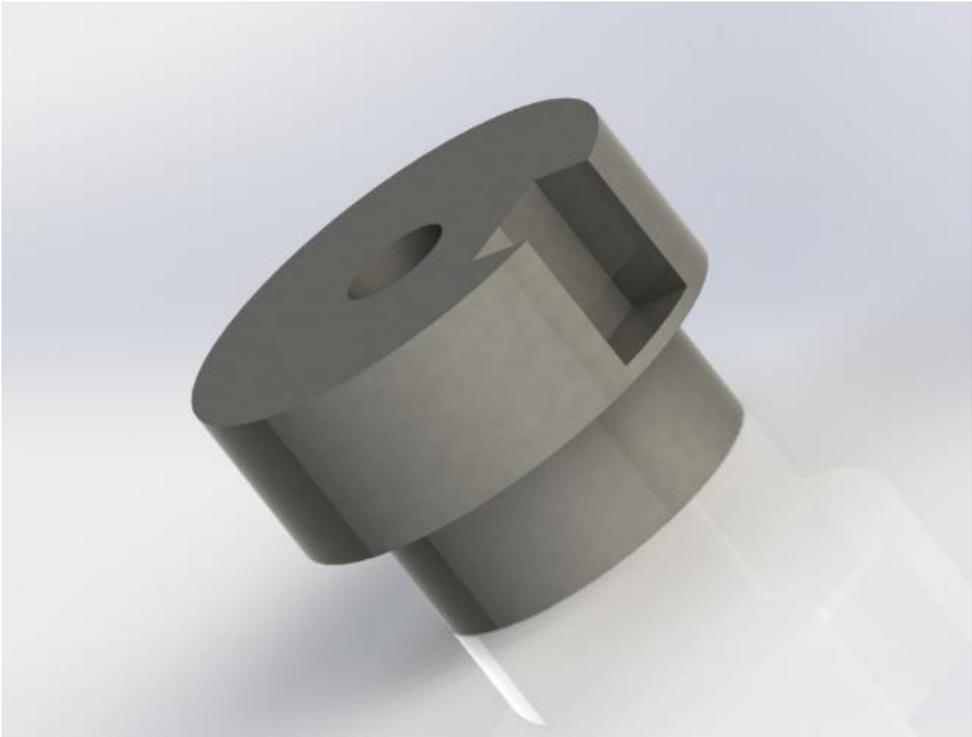


Figure 52: shoulder

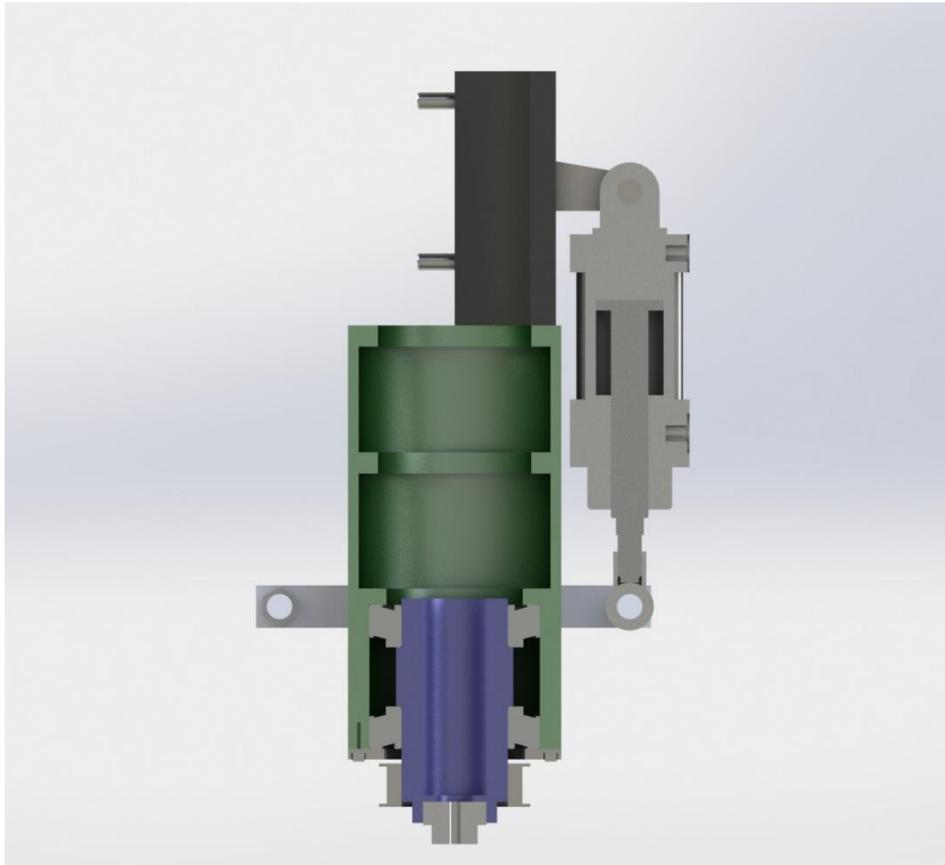


Figure 53: ensemble shoulder

Les dimensions des pièces ont été choisies de sorte à respecter les conditions suivantes :

- Accueillir le fourreau de la perceuse qui fait 71 mm de diamètre extérieur :
- Permettre un mouvement relatif en translation et en rotation du pion et du shoulder.
- Donner une course prédéfinie au shoulder et au pion.
- Pouvoir s'adapter aux dimensions standards des roulements qu'on trouve sur le marché.
- Disponibilité de la matière pour la réalisation.
- Réduire les dimensions au maximum pour éviter des problèmes d'encombrement sur la perceuse.
- Le mouvement de rotation du shoulder est assuré par un moteur et un système poulie courroie, la poulie étant fixée sur le porte shoulder. Le choix du système poulie courroie a été fait par rapport à deux critères essentiels :
 - La flexibilité qu'il offre pour un mouvement axial du shoulder.
 - La simplicité de réalisation.

Le mouvement de translation du shoulder est assuré par un vérin dont on donnera la nature et les dimensions ultérieurement.

On peut voir sur la figure suivante l'ensemble monté vu en coupe.

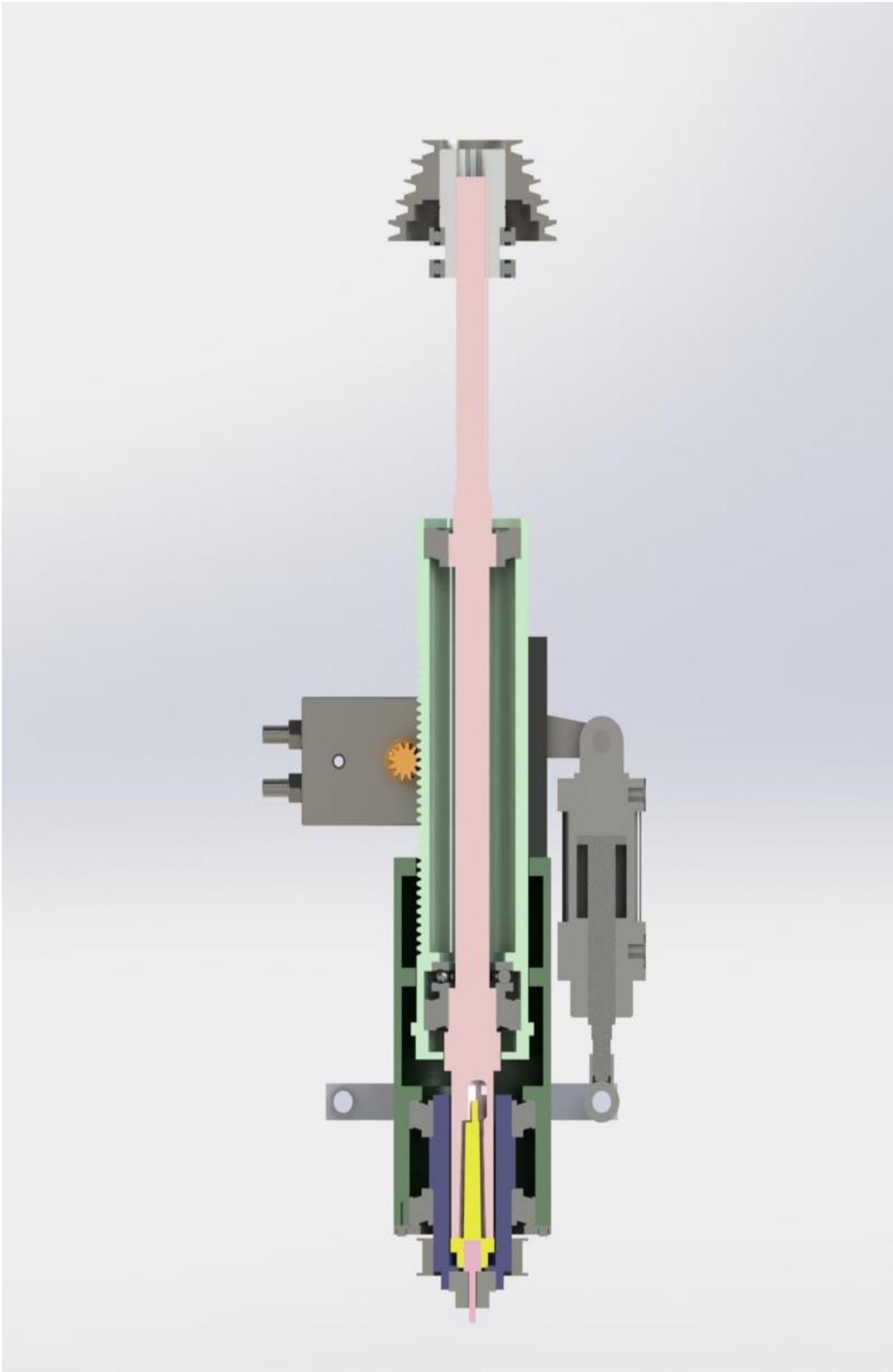


Figure 54: vue en coupe de l'ensemble

IV.3. Dimensionnement

IV.3.1. Efforts

Afin de déterminer les forces axiales appliquées au pin et au shoulder on se base sur deux études menées par Johnson (2001) « Forces in friction stir welding of aluminium alloys » et Ding (2000) « Force characterisation on the welding pin of a friction stir welding reconfigurable pin-tool using aluminium-lithium 2195 ». Les forces appliquées sur le pin peuvent être calculées indépendamment de celles exercées sur le shoulder.

Forces Axiales

SHOULDER :

Jhonson a utilisé les combinaisons suivantes dans son étude :

Tableau 6: configuration de l'outil choisi par Jhonson [32]

Outil	Diamètre du shoulder (mm)	Diamètre du pin (mm)	Longueur du pin (mm)
K1	25	10	6.1
K2	25	8	5.8
K3	20	8	5.6
K4	20	9	6.15

Différents procédés ont été employés, la profondeur de pénétration était d'environ 0.2 mm Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7: forces obtenues par Jhonson [32]

Outil	Alliage	Vitesse de rotation (tr/min)	Force axiale (kN)	Couple de torsion (Nm)
K1	6082-T6	500	13.5	55
K2	6082-T6	500	14	56
K3	6082-T6	500	11	41
K4	6082-T6	500	10.5	41

On peut calculer la pression appliquée sur le métal si la surface du shoulder est connue.

On présente dans ce qui suit les surfaces des shoulders et les pressions qu'ils appliquent :

Tableau 8: forces appliquées par le shoulder selon Jhonson

Outil	Diamètre du shoulder (mm)	Diamètre du pin (mm)	Surface du shoulder (mm ²)	Force axiale (kN)	Pression (Mpa)
K1	25	10	412.3×10^{-6}	13.5	32.74
K2	25	8	412.3×10^{-6}	14	31.77
K3	20	8	263.9×10^{-6}	11	41.68
K4	20	9	250.5×10^{-6}	10.5	41.92

Utilisant les données précédentes on peut établir une relation pour le calcul des forces pour notre outil comme illustré sur le graphe suivant :

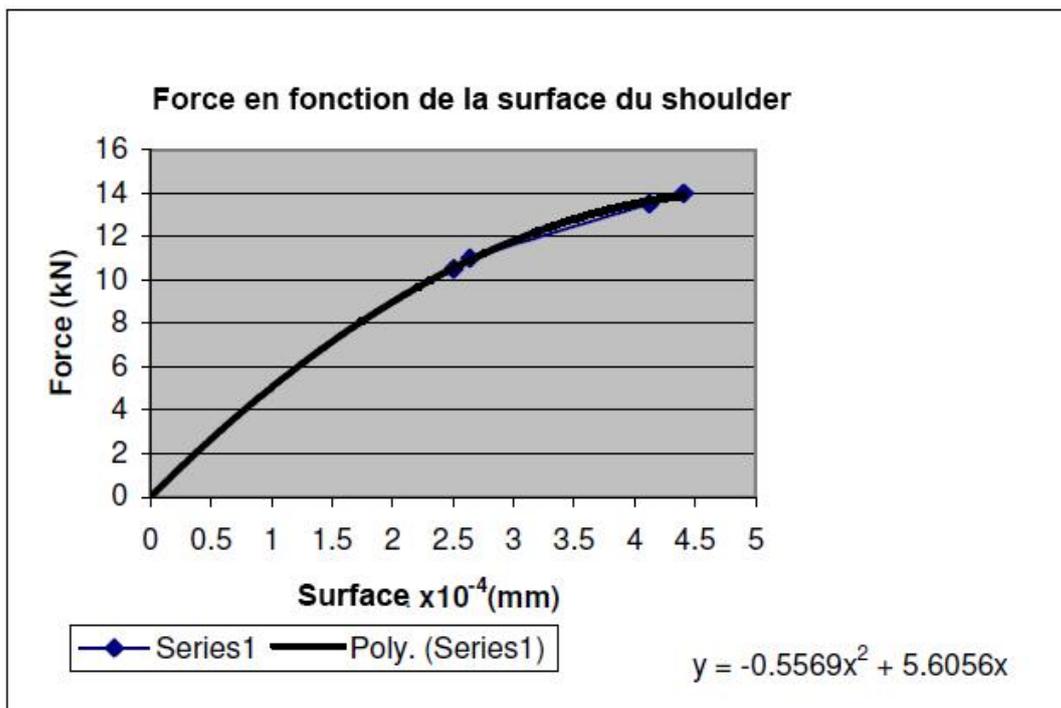


Figure 55: Courbe de variation de la force axiale en fonction de l'aire du shouder [33]

On calcule la surface du shoulder :

$$S_{shoulder} = \pi \frac{D^2 - d^2}{4}$$

Avec :

- D : diamètre du shoulder.
- d : diamètre du pin.

Nous avons choisis un diamètre de 16mm pour le shoulder et un diamètre de 6 mm pour le pin.

$$S_{shoulder} = \pi \frac{16^2 - 6^2}{4} = 1.782 \times 10^{-4} m^2$$

Du graphe on tire la force axiale appliquée sur le shoulder : 8kN.

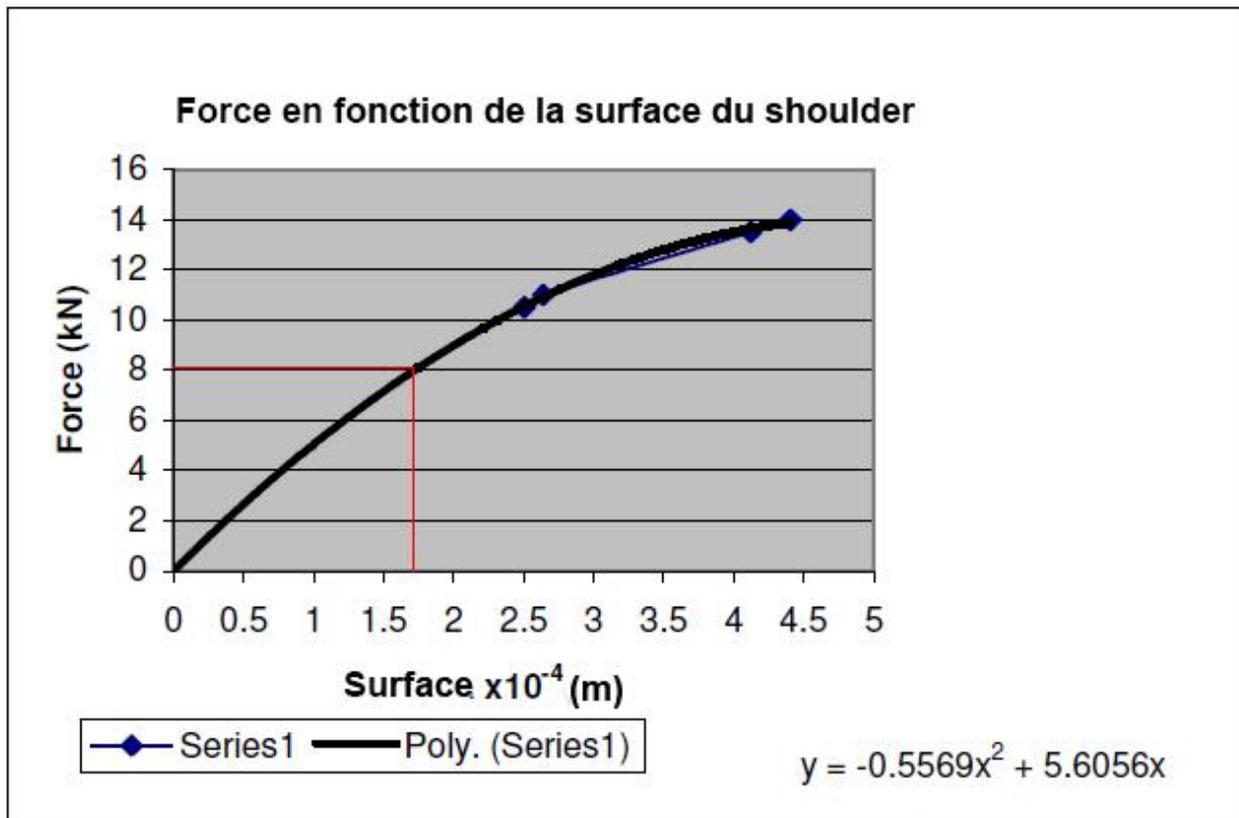


Figure 56: choix de la force axiale appliquée au shoulder [33]

PIN

On se base sur les travaux de Ding pour calculer les forces axiales qui concernent le pin.

Ding a utilisé la configuration suivante :

Tableau 9: configuration de l'outil choisi par Ding [34]

Outil	Diamètre du shoulder (mm)	Diamètre du pin (mm)
RPT	24	9.6

Au courant de cette étude la profondeur de pénétration reste fixée à 0.254mm. La profondeur de pénétration du pion varie, 4 essai statiques ont été réalisés.

Tableau 10: forces sur le ping par Ding [34]

Test	Diamètre du pin (mm)	Pression max durant la pénétration (Mpa)	force max durant la pénétration (kN)
1	72.38×10^{-6}	69.57	5.036
2	72.38×10^{-6}	69.06	4.999
3	72.38×10^{-6}	75.64	5.547
4	72.38×10^{-6}	79.75	5.773

On calcule des valeurs de la pression, la force équivalente pour un pin de 6 mm de diamètre :

Le diamètre du pin est de $0.283 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

On calcule la force maximale donnée pour le test numéro 4 :

$$F = P \times S = 2254.88 \text{ N}$$

Avec un coefficient de sécurité de 4 on trouve 9kN.

Couples de Torsion

Les couples de torsion sont calculés suivant le même modèle suivi pour le calcul des embrayages :

L'équation est donnée par :

$$C = \frac{2}{3} N f \frac{R_e^3 - R_i^3}{R_e^2 - R_i^2}$$

Avec :

- N : charge axiale.
- f : coefficient de frottement (0.4 pour le contact acier aluminium).

SHOULDER :

$$C_{shoulder} = \frac{2}{3} \times 0.4 \times 8000 \times \frac{8^3 - 3^3}{8^2 - 3^2} \times 10^{-3} = 18.81 \text{ Nm}$$

PIN

$$C_{pin} = \frac{2}{3} \times 0.4 \times 2254.88 \times \frac{3^3 - 0^3}{3^2 - 0^2} \times 10^{-3} = 1.804 \text{ Nm}$$

Efforts tranchants

$$C = T \times r \Rightarrow T = \frac{C}{r}$$

SHOULDER

$$T_{shoulder} = 2351.25 \text{ N}$$

PION

$$T_{pin} = 601.33 \text{ N}$$

IV.3.2. Choix des roulements

Le choix des roulements s'est fait selon les critères suivants :

- Charges dans le système.
- Vitesse de rotation du shoulder.
- Encombrement dans la machine.

Le choix s'est porté sur des roulements à rouleaux coniques avec les caractéristiques suivantes :

Dimensions d'encombrement			Charges de base		Vitesses de base		Désignation
d	D	T	dynamique C	statique C ₀	Vitesse de référence	Vitesse limite	* Roulement SKF Explorer
mm			kN		tr/min		-
50	80	20	60,5	88	6000	8000	32010 X/Q

Figure 57: choix du roulement, catalogue SKF. [35]

On voit que ce type de roulement supporte parfaitement les charges axiales qui sont dominantes dans notre machine. Il offre aussi la possibilité de travailler à une vitesse de rotation plus ou moins élevée.

IV.3.3. Choix des vérins

Pour assurer les déplacements en translation dans la machine nous avons choisi d'utiliser des vérins. Les vérins nous permettent le maintien d'une valeur définie de force pendant un certain temps, ce qui est nécessaire pour le processus de soudage. D'autre part les vérins permettent de réduire l'encombrement dans la machine.

Pour le choix des vérins deux solutions ont été envisagées : des vérins pneumatiques ou des vérins hydrauliques.

Les vérins pneumatiques offrent une bonne réactivité même sous de grandes charges, leur technologie est simple et leur design robuste, ils ont aussi l'avantage d'utiliser l'air comme fluide actionneur. Cependant la compressibilité de l'air donne lieu à des soucis de stabilité ce

qui cause problème au niveau de la commande, l'autre inconvénient est leur incapacité à travailler à des charges aussi élevées que les vérins hydrauliques.

Les vérins hydraulique sont adaptés à ce type de travail, ils offrent une bonne flexibilité et une action uniforme, ils sont moins sujets aux variations de la charge que les vérins pneumatiques, d'autre part en cas de surcharge une baisse de pression automatique peut être installé afin de sécuriser le système. Ce type de vérins offre la possibilité d'appliquer une grande pression avec un contrôle très précis.

Les calculs précédemment réalisés pour les charges axiales nous donnent la possibilité de dimensionner nos vérins.

Pour la translation du shoulder nous utiliserons un vérin linéaire à double effet pour le et un vérin rotatif à double effet pour le pion, ceci nous permettra une commande précise dans les deux sens.

CALCULS :

Solution pneumatique :

En tenant compte du frottement dans le vérin qu'on estimera à 10% de la force de poussée théorique, nous calculerons le diamètre d'alésage nécessaire pour fournir l'effort axial dont nous avons besoin.

Les vérins pneumatiques pouvant supporter une pression allant à 12 bars, le compresseur dont on dispose fournit une pression de 7 bars.

$$P = \frac{F_{th}}{S} \Rightarrow S = \frac{F_{th}}{P} \text{ avec } S = \pi \times r^2 \Rightarrow r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

Avec :

- S : section de l'alésage du piston.
- r : rayon de l'alésage.
- F_{th} : force de poussée théorique.
- P : pression de service.

Pour : $F_{th} = 8000\text{N}$ et $P = 7 \text{ bar}$ on trouve $S = 11.428 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \Rightarrow r = 60 \text{ mm}$.

Pour actionner le shoulder à l'aide d'une solution pneumatique, nous devons utiliser un vérin dont le diamètre d'alésage est de 120mm. Cette solution est rejetée, vu qu'elle est trop encombrante. Le choix se porte donc sur les vérins hydrauliques.

Solution hydraulique :

Shoulder :

Nous envisageons d'employer un vérin linéaire à double effet avec une pression de fonctionnement maximale de 160 bars et dont le diamètre est de 32mm.

Vérification :

$$P = \frac{F_{th}}{S} \Rightarrow F_{th} = P \times S$$

$$F_{th\ max} = 160 \times 10^5 \times 2.56 \times \pi \times 10^{-4} = 12868\ N$$

$$F_{réelle\ max} = F_{th\ max} - 0.1 F_{th\ max} = 11518.2\ N$$

Nous utiliserons un vérin hydraulique linéaire à double effet d'un diamètre d'alésage de 32mm afin d'assurer le mouvement de translation du shoulder.

Pin :

La roue dentée qui actionne la crémaillère au niveau de la perceuse a un diamètre de 30 mm, ce qui fait que le couple dont on a besoin au niveau du vérin rotatif est :

$$C = F_{pin} \times r_{pignon}$$

Avec :

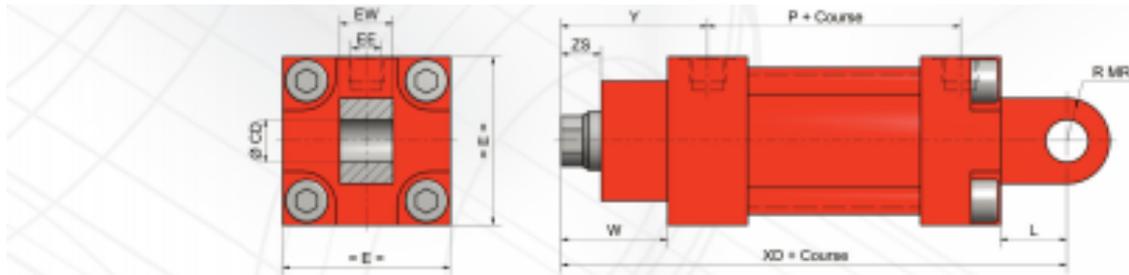
- r_{pignon} : rayon du pignon.
- F_{pin} : force axiale du pin.

$$C = 2500 \times 15 \times 10^{-3} = 37.5\ Nm$$

On choisit un vérin rotatif hydraulique HTR Parker pouvant délivrer un couple allant jusqu'à 80 Nm ce qui nous permettra d'avoir une large gamme de forces axiale sur le pin pour des fins d'essais de soudure.

Le vérin est du type HTR9.

Les vérins sont commandés par des distributeurs hydrauliques à commande électrique du type 4/3 qui nous permet de commander les vérins à double effet



\varnothing Alésage	25	32	40	50	63	80	100	125
\varnothing MM (\varnothing Tige)	16	18	22	28	36	45	56	70
\varnothing B	36	40	45	56	63	80	100	125
\varnothing CD	12	12	16	20	25	32	40	50
E	45	56	63	75	85	106	125	160
EE	1/8	1/8	1/4	1/4	3/8	3/8	1/2	1/2
EW	16	16	20	25	32	40	50	63
\varnothing FB	6,6	9	11	11	14	18	20	22
L	20	20	25	25	32	40	56	63
R MR	14	14	16	20	25	32	40	50
P	34	45	45	53	56	63	70	80
RB	34	36	45	50	65	80	97,5	125
TF	56	71	80	95	104	132	155	195
UF	70	86	100	115	124	160	185	230
W	28	32	40	40	45	50	58	63
WF	16	16	20	16	21	22	24	27
XD	112	122	140	150	177	192	233	261
Y	46	48	55	57	71	74	81	93
ZB	92	102	115	125	145	152	177	198
ZS	12	12	15	12	17	18	20	23

Toutes les cotes sont en mm

Figure 58: choix du vérin linéaire, catalogue HPS. [36]

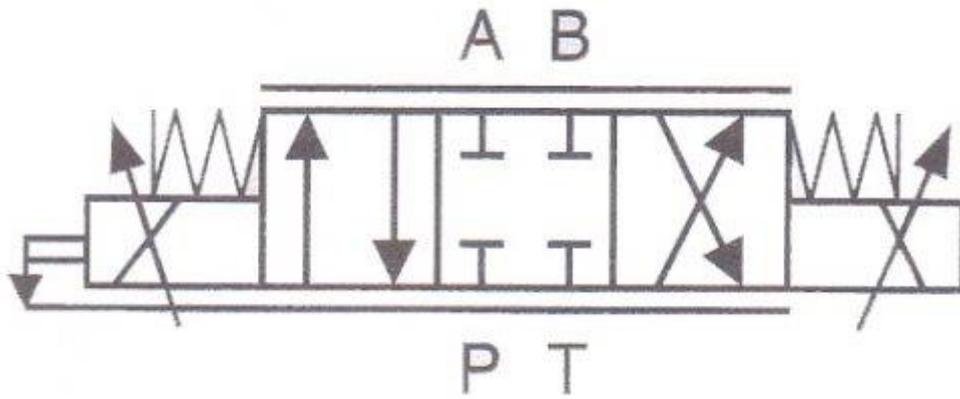


Figure 59: Distributeur hydraulique 4/3 pour vérin double effet.

- A et B : vers l'installation.
- P : prise de pression.
- T : retour vers le bac d'huile.

IV.3.4. Choix du moteur du shoulder

On choisit un moteur vertical (à flasque) B5, celui-ci s'adaptant le mieux à notre conception en termes de fixation.



Figure 60: moteur à flasque type B5.

CARACTERISTIQUES DU MOTEUR

Puissance :

La rotation du shoulder nécessite un couple de 18.81 Nm, sa vitesse de rotation varie entre 500 et 1500 tr/min.

$$P = C \times \omega$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \text{ Avec } N \text{ en tr/min}$$

$$\omega_{max} = 157 \text{ rad/s}$$

$$P = 18.81 \times 157 = 2954.66 \text{ w}$$

On prendra une vitesse nominale du moteur de 1500 tr/min

Choix du moteur :

On prend le moteur avec les caractéristiques suivantes :

Tableau 11: plaque signalétique du moteur du shoulder.

Hauteur d'axe	mm	63
Puissance	kW	3.3
Nombre de pôles		2
Tension	V	230
Fréquence alimentation	Hz	50
Indice de protection	IP	55
Classe d'isolation		F

La hauteur d'axe est un élément important du choix du moteur, un axe plus long permettra une plus grande liberté en translation à la poulie du moteur shoulder.

IV.3.5. Poulie et courroie

Nous avons choisis d'utiliser une poulie crantée pour l'entraînement du shoulder en rotation et ce pour les raisons suivantes :

- Réduction de l'encombrement par rapport aux systèmes à engrenage.
- Facilité de réalisation et d'entretien.
- Flexibilité par rapport aux mouvements du shoulder.
- pas de glissement de la courroie.

Pour une première configuration on souhaite avoir une vitesse de 900 tr/min au niveau du Shoulder. On calcule le diamètre de la poulie « moteur shoulder », le diamètre de la poulie liée à la porte shoulder étant imposé par ses dimensions.

Diamètre poulie porte shoulder : 60 mm

On a la relation suivante entre les diamètres des poulies :

$$N_1 D_1 = N_2 D_2 \Rightarrow D_2 = D_1 \times \frac{N_1}{N_2}$$

$N_1 = 900$ tr/min, $N_2 = 1500$ tr/min, $D_1 = 60$ mm

Après calcul on trouve : $D_2 = 36$ mm

La longueur de la courroie est calculée par le logiciel de CAO SolidWorks.

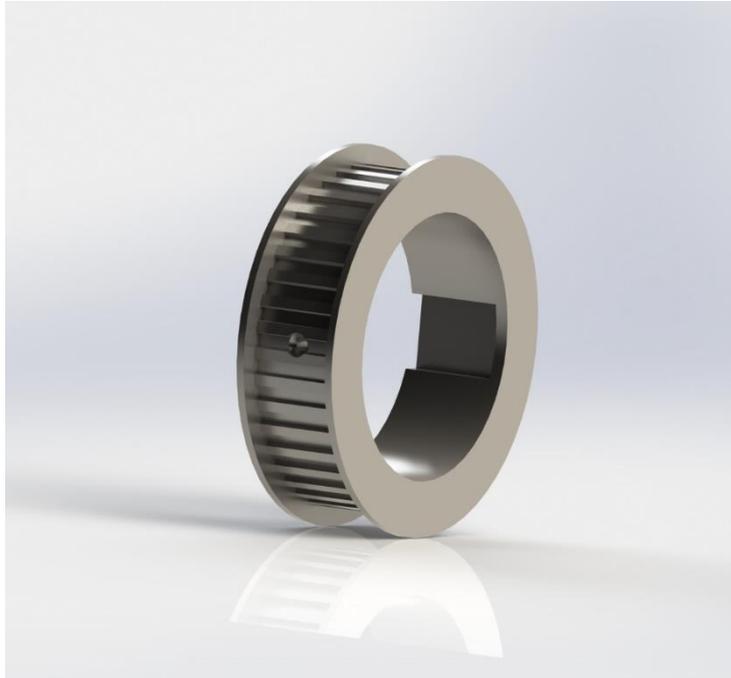


Figure 61: poulie crantée

IV.3.6. Vérification clavettes

VERIFICATION AU CISAILLEMENT :

Pour qu'une clavette résiste en cisaillement, il faut que la contrainte τ soit $<$ ou $=$ à R_{pg} . Pour vérifier cette condition, il suffit de dérouler les calculs ci-dessous :

- Surface cisailée S_c (mm²) :
 - o $S_c = b \times L$ avec b = largeur de la clavette en mm et L = longueur de la clavette en mm
- Effort appliqué sur la clavette F (N) :
 - o $F = 2C / D$ avec C = couple dans l'arbre en N.mm et D = diamètre de l'arbre en mm
- Contrainte de cisaillement τ (MPa) :

- $\tau = F / S_c = 2C / bLD \leq R_{pg}$ avec R_{pg} = résistance pratique élastique au glissement (ou cisaillement)

$R_{pg} = R_g / s$ avec s = coefficient de sécurité (généralement = à 2).

$R_g = 0,5 \text{ à } 0,8 R_e$ avec R_e = Résistance élastique à la traction.

VERIFICATION AU MATAGE :

Pour qu'une clavette résiste au matage, il faut que la pression de matage P soit $<$ ou $=$ à la pression admissible P_a . Pour vérifier cette condition, il suffit de dérouler les calculs ci-dessous :

- Surface matée S_m (mm²) :
 - $S_m = (h \times L) / 2$ avec h = hauteur de la clavette en mm et L = longueur de la clavette en mm
- Effort appliqué sur la clavette F (N) :
 - $F = 2C / D$ avec C = couple dans l'arbre en N.mm et D = diamètre de l'arbre en mm
- Pression de matage P_m (MPa) :
 - $P_m = F / S_m$
- Pression admissible P_a (MPa) :
 - Clavetage glissant sous charge : 2 à 20 MPa
 - Clavetage glissant sans charge : 20 à 50 MPa
 - Clavetage fixe (cas le plus fréquent) : 40 à 150 MPa

Notre conception comporte des clavettes entre les éléments suivants :

- Pion / porte pion.
- Shoulder / porte shoulder.
- Porte shoulder / poulie.

Les dimensions des clavettes sont comme suit (en mm) :

Tableau 12: dimensions des clavettes de la conception.

	B	H	L
Pion / porte pion	4	4	15
Shoulder / porte shoulder	8	7	10
Porte shoulder / poulie	14	9	18

- Pour les aciers, $R_e = 240 \text{ Mpa} \rightarrow R_g = 120 \text{ Mpa}$ et $R_{pg} = 60 \text{ Mpa}$

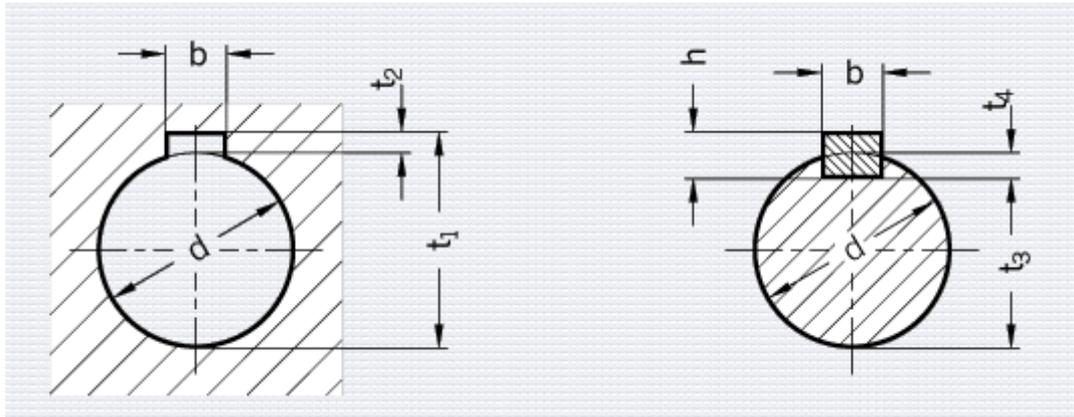


Figure 62: dimensions des clavettes.[37]

Tableau 13: dimensions des clavettes suivant le diamètre de l'arbre [37]

d	b P9 Hub-keyway	b P9 Shaft-keyway	h	$t_1 = d + t_2$	t_2	$t_3 = d - t_4$	t_4
7	2	2	2	8	1+0,1	5,8	1,2+0,1
8	2	2	2	9	1	6,8	1,2
9	3	3	3	10,4	1,4	7,2	1,8
10	3	3	3	11,4	1,4	8,2	1,8
11	4	4	4	12,8	1,8	8,5	2,5
12	4	4	4	13,8	1,8	9,5	2,5
13	5	5	5	15,3	2,3	10	3
14	5	5	5	16,3	2,3	11	3
15	5	5	5	17,3	2,3	12	3
16	5	5	5	18,3	2,3	13	3
17	5	5	5	19,3	2,3	14	3
18	6	6	6	20,8	2,8	14,5	3,5
20	6	6	6	22,8	2,8	16,5	3,5
22	6	6	6	24,8	2,8	18,5	3,5
24	8	8	7	27,3	3,3+0,2	20	4+0,2
25	8	8	7	28,3	3,3	21	4
26	8	8	7	29,3	3,3	22	4
28	8	8	7	31,3	3,3	24	4
30	8	8	7	33,3	3,3	26	4
32	10	10	8	35,3	3,3	27	5
34	10	10	8	37,3	3,3	29	5
35	10	10	8	38,3	3,3	30	5
36	10	10	8	39,3	3,3	31	5
38	10	10	8	41,3	3,3	33	5
40	12	12	8	43,3	3,3	35	5
42	12	12	8	45,3	3,3	37	5
44	12	12	8	47,3	3,3	39	5

Les calculs sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 14: calculs clavettes.

	Sc (mm ²)	Sm (mm ²)	T (Mpa)	Pm(Mpa)
Pion / porte pion	60	60	39.18	39.18
Shoulder / porte shoulder	80	70	7.51	8.59
Porte shoulder / poulie	252	162	0.73	1.13

On remarque de ces calculs que les limites de résistance au cisaillement et au matage sont respectées par les clavettes choisies.

Conclusion générale

Ce projet, de fin d'études, rentre dans le cadre d'un travail de recherche du laboratoire LGMD concerne une étude conceptuelle d'une machine de soudage par friction par point (FSSW). Ce travail forme la première étape d'un projet qui vise en premier lieu la réalisation d'un prototype physique avec une commande automatisée des organes en mouvement. La deuxième étape concerne des de soudage sur différents métaux et l'étude des paramètres du soudage et de monter un certain nombre de manip.

Nous estimons que nous avons réalisé les objectifs tracés pour ce travail.

Enfin, en perspectives, nous proposons que ce travail sera suivi d'une étude de réalisation qui aboutira à la fabrication d'un prototype sur lequel se feront des travaux de recherche et seront montées certaines manip.

Bibliographie

- [1] Weman, K. (2011). *Welding processes handbook*. Elsevier..
- [2] www.rodacier.com
- [3]
- [4] Knipstorm, K. E., & Pekkari, B. (1997, February). A novel joining process-friction stir welding. In *IIW Conference Proceedings: Trends in welding of lightweight automotive and railroad vehicles. Wels, Österreich: Fronius*
- [5] L.M GOUES « Friction Welding », Principle of Welding Technology, 2nd edition, pp 16-19 (1986)
- [6] OT. Midling, J.S. Kvale et O.Dahl. Proc. 1st International on Friction Stir Welding Thousands Oaks, California
, Usa, June 1999.
- [7] J.Przydatek. Proc. 1st International on Friction Stir Welding Thousands Oaks, California
, Usa, June 1999.
- [8] The inspection of friction stir welded aluminium plant (C R Bird-TWI)
- [9]SB. DUNKERTON «Toughness properties of friction welds in steel », *Welding Journal* Vol. 65, No8, pp. 193S-292S.
- [10] LM.Gourd « Friction Welding » Principle of Welding Technology, 2nd edition, pp 16-19, (1986).
- [11] site internet du CERN.
- [12] TS-Note-2005-031, Le soudage de l'aluminium et de ses alliages, G. Favre, 25 mai 2005.
- [13] Georgeou, Z. and Hattingh, D.J. (2004) Retractable Pin Tool for the use with the Friction Stir Welding Process. RSA Patent
Application Number 2004/05 38
- [14] Hansen, M. (2003) A cooler weld, *In Mechanical Engineering Design*,
[Online], Available:
<http://www.memagazine.org/medes03/coolweld/coolweld.html>
[2003, August 19]
- [15] NASA Techtrans (2001) *Friction Stir Welding*. [Online]. Available:
<http://techtan.msfc.nasa.gov/pdf/FSW11.20.01.pdf>
[2004, January 29]
- [16] Song, M. and Kovacevic, R. (2003b) Thermal modelling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation.

International Journal of Machine Tools & Manufacture 43,
605-615

[17] Wykes, D.H. (1997) Adjustable Pin for Friction Stir Welding Tool.
US Patent number 5,697,544

[18] Young, W.C. (1989) *Roark's Formula's for Stress and Strain*. 6th
edition. McGraw-Hill, Inc., United States of America.

[19] Silyn-Roberts, H. (2000) *Writing for Science and Engineering: Papers
Presentations and Reports*. Butterworth Heinemann, Oxford.

[20] T.-Y. Pan, SAE Technical papers, 2007-01-1702.

[21] H. K. D. H. Bhadeshia, T. DebRoy, *Sci. Technol. Weld.
Join.*, 14 (2009) 3, 193-196.

[22] C. D. Allen, W. J. Arbegast, SAE Technical papers, 2005-01-1252.

[23] G. SAYEGH et R.CAZES « Possibilités et perspectives du soudage par friction,
applications- évolution de la technique et perspectives » soudage et techniques connexes pp
152-160.

[24] B. Karpe, A. Nagode, B. Kosec, A. Stoić, M. Dolenc, M.
Bizjak, *Metalurgija*, 52 (2013) 3, 305-308.

[25] PDF DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A FRICTION STIR SPOT WELDING
PROCESS FOR ALUMINIUM

[26] Schilling, C., von Strombeck. A., dos Santos. J. and von Heesen, N.
(2000) *A Preliminary Investigation on the Static Properties of
Friction Stir Spot Welds*. 2nd International FSW Symposium,
Gothenburg, Sweden.

[27] P. Pragnell, J. Robson, *Metallurgical Challenges in Joining
Lightweight Dissimilar Materials*, [http://www.latest2.manchester.
ac.uk/documents/2011joining/P.Pragnell.pdf](http://www.latest2.manchester.ac.uk/documents/2011joining/P.Pragnell.pdf).

[28] Page, M. (2003) *Friction stir welding broadens applications base*.

[29] Y.-C. Lin, J.-J. Liu, B.-Y. Lin, C.-M. Lin, H.-L. Tsai, *Mater.
& Design*, 35 (2012), 350-357.

[30] Johnson, R. (2001) *Forces in Friction Stir Welding of Aluminium
Alloys*. 3rd International Friction Stir Welding Symposium,
Kobe, Japan.

[31] Johnson, R. and Kallee, S. (1999) *Friction Stir Welding*. [Online],
Available: <http://ww.azom.com/details.asp?ArticleID=1170>

[2004, January 30]

[32] Johnson, R. (2001) Forces in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. 3rd International Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan.

[33] L. Zhou, D. Liu, K. Nakata, T. Tsumura, H. Fujii, K. Ikeuchi, Sci. Technol. Weld. Join., 17 (2012) 8, 649-655.

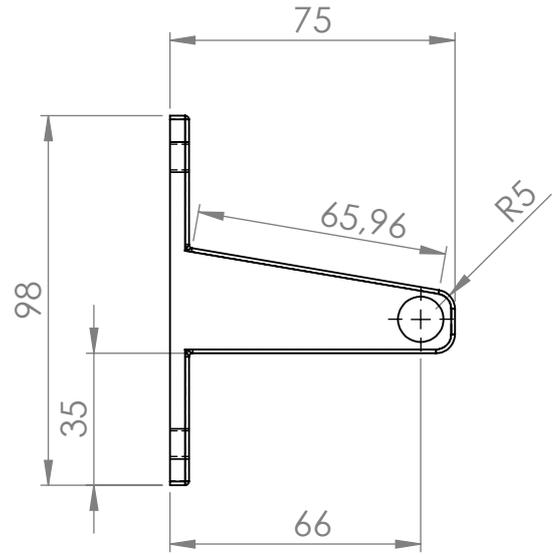
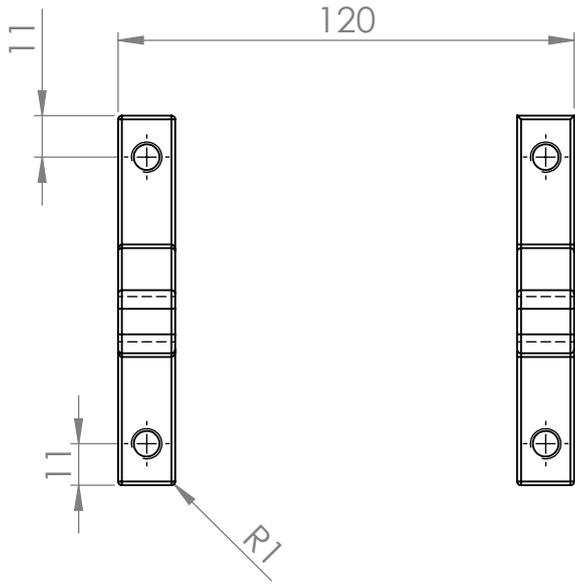
[34] National Center for Advanced Manufacturing (2004) *Friction Stir Welding*. [Online]. Available:
<http://www.ncampl.org:2004/technology/FSW.htm>

[2004, March 1]

[35] P. Su, A. Gerlich, T. H. North, SAE Technical paper (2005) 2005-2001-1255.

ANNEXES

Tolérance Générale: 0.1



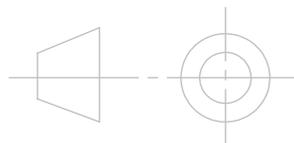
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle

1:1

Etudiant

promoteur



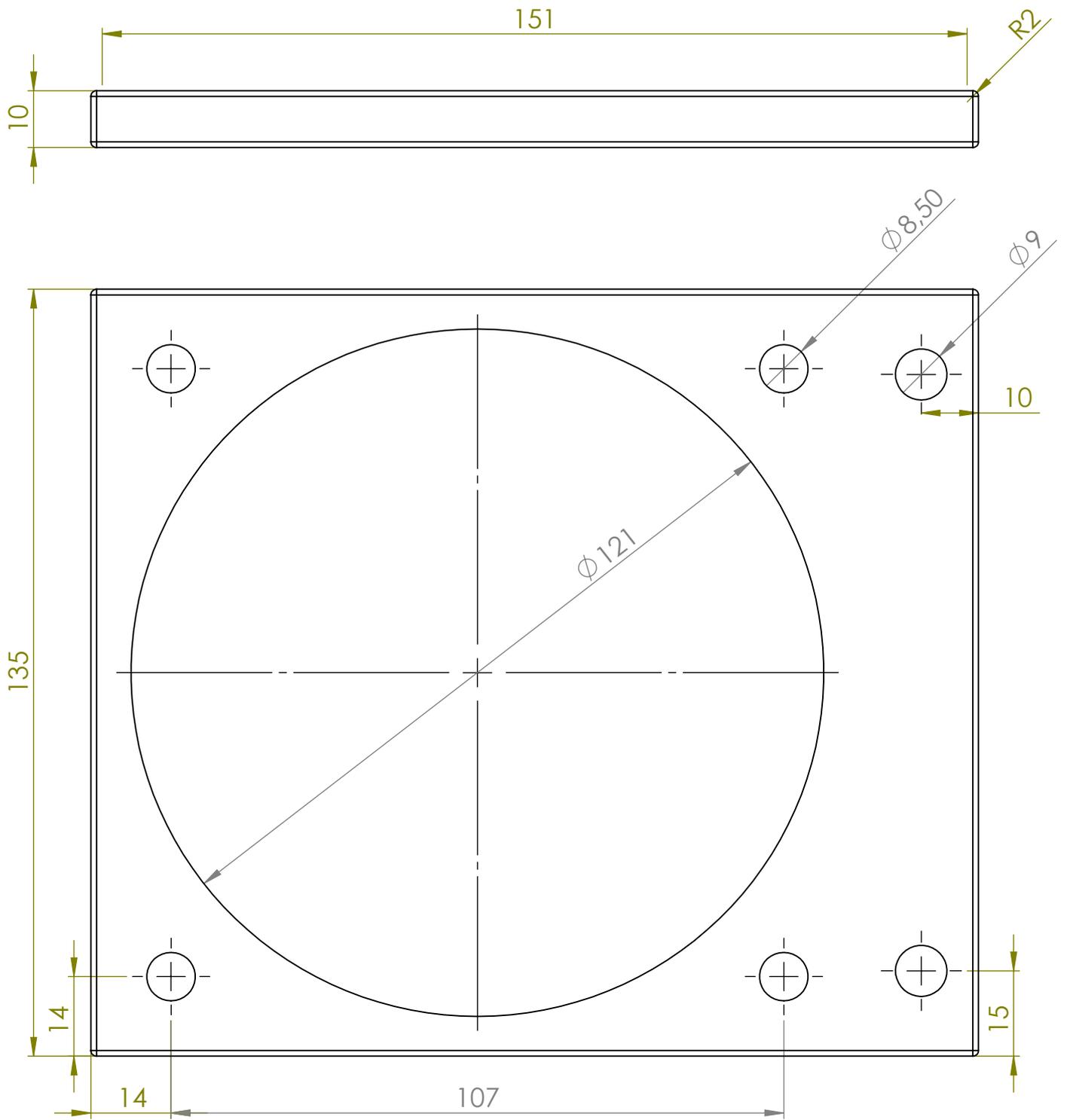
AMMALI

BELHADEF

SUPPORT VERIN

ENP
G.MECANIQUE

Tolérance Générale: 0.1



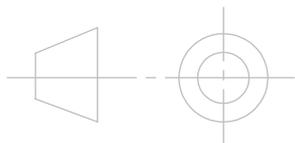
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle

1:1

Etudiant

promoteur



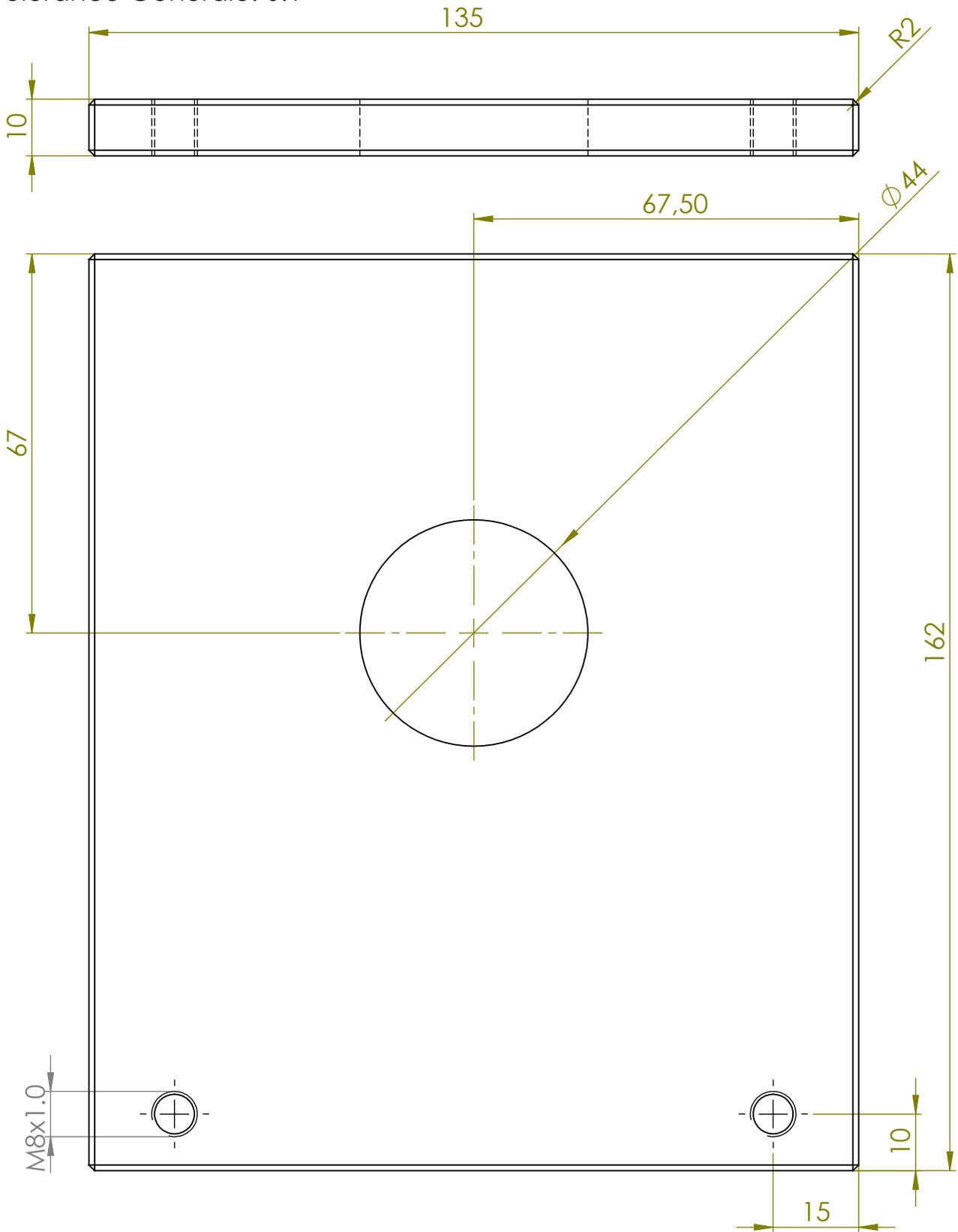
SUPPORT
MOTEUR
2

MATIERE

XC35

ENP
G.MECANIQUE

Tolérance Générale: 0.1



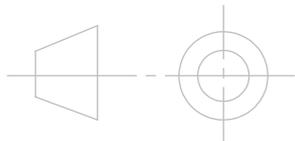
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle

1:1

Etudiant

promoteur



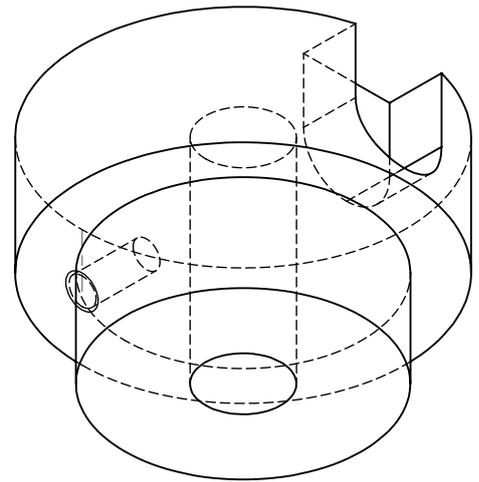
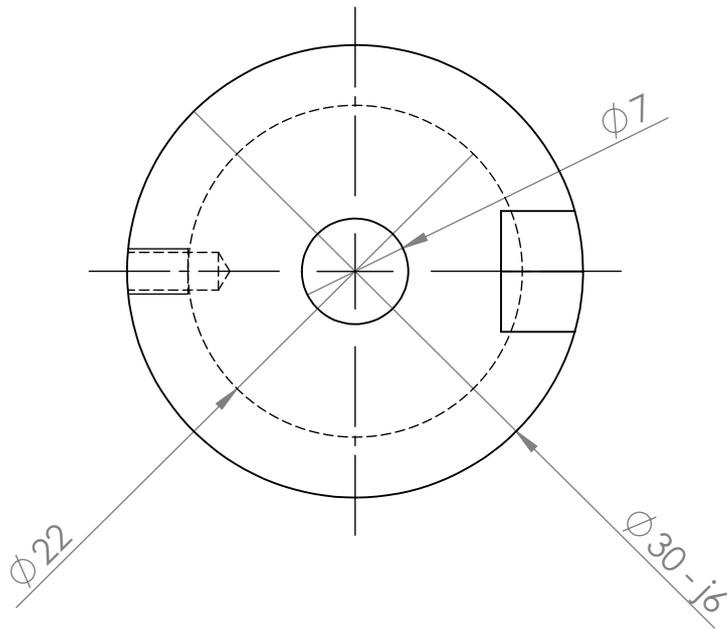
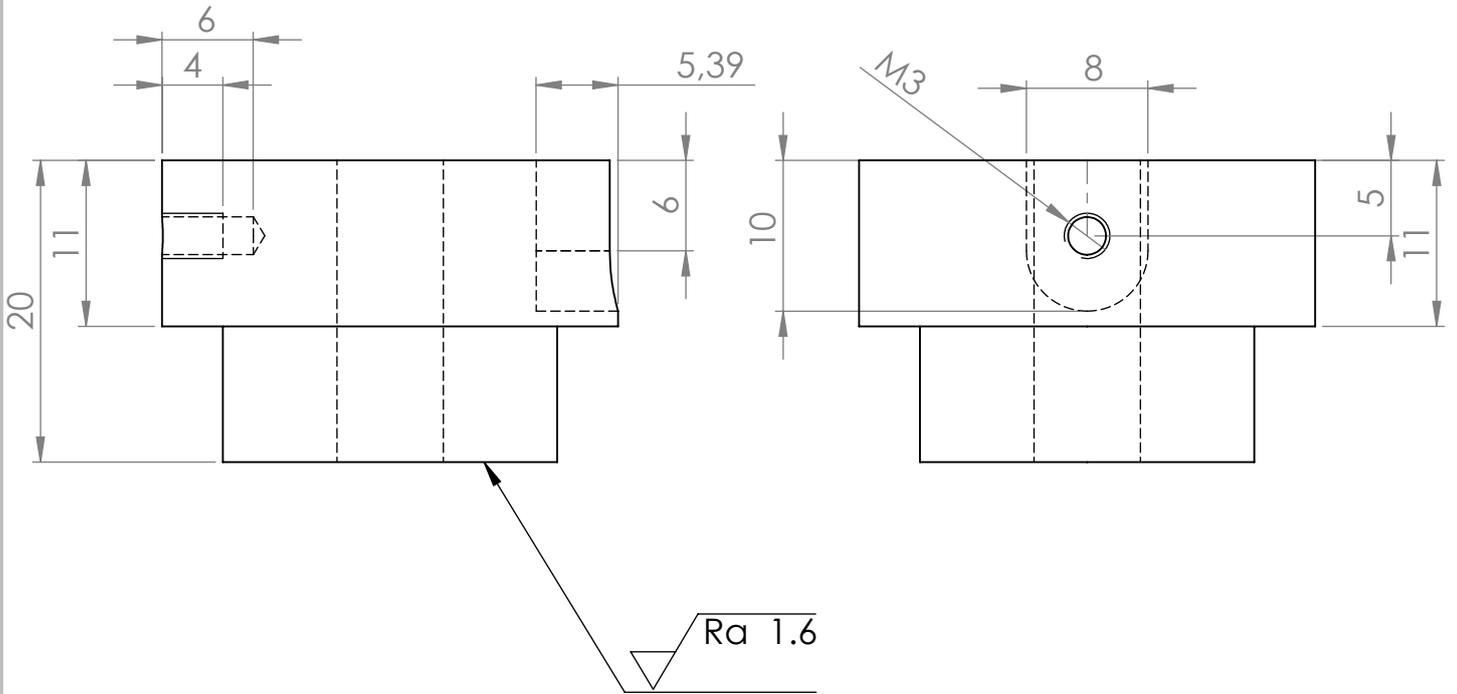
SUPPORT MOTEUR

ENP
G.MECANIQUE

AMMALI

BELHADEF

Tolérance Générale: 0.1



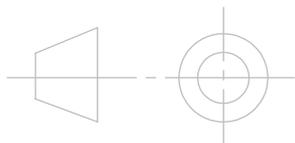
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle

2:1

Etudiant

promoteur



AMMALI

BELHADEF

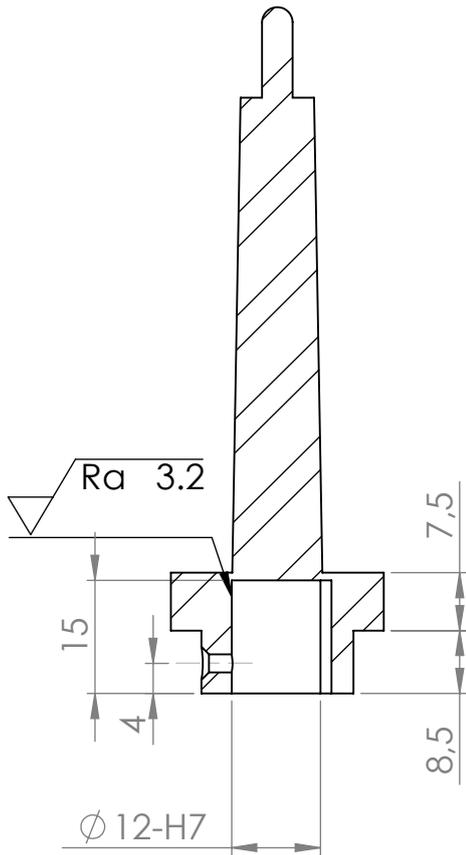
SHOULDER

MATIERE

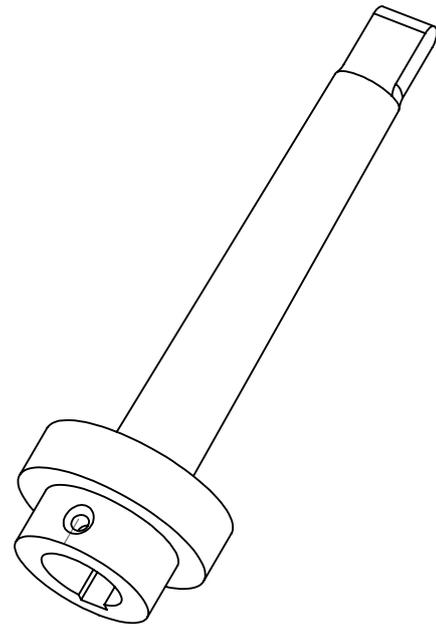
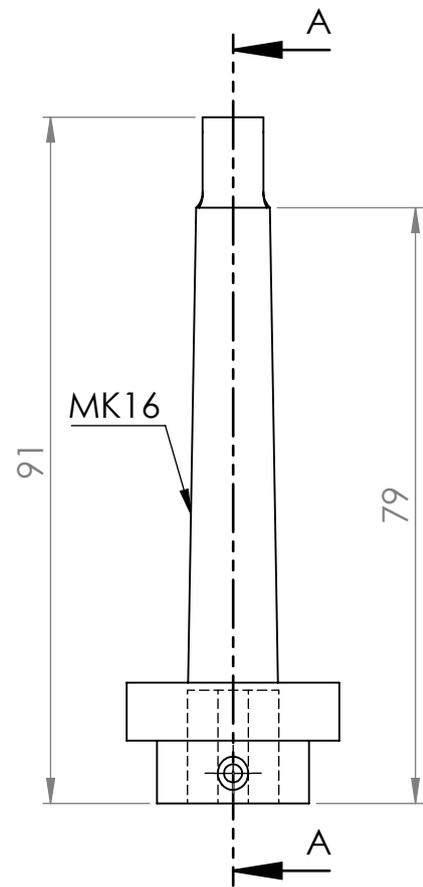
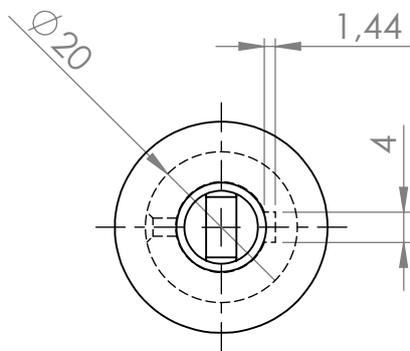
xc 35 traite

ENP
G.MECANIQUE

Tolérance Générale: 0.1



COUPE A-A



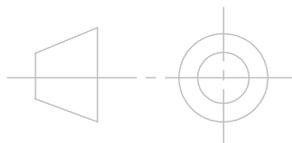
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle

1:1

Etudiant

promoteur



AMMALI

BELHADEF

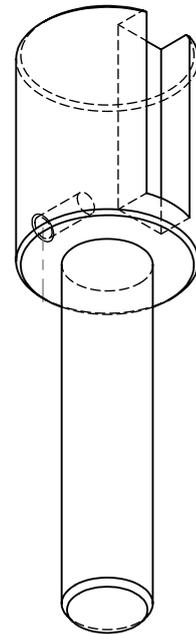
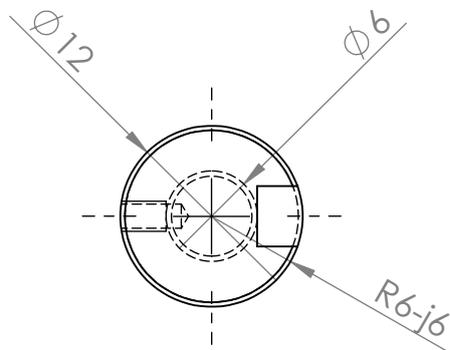
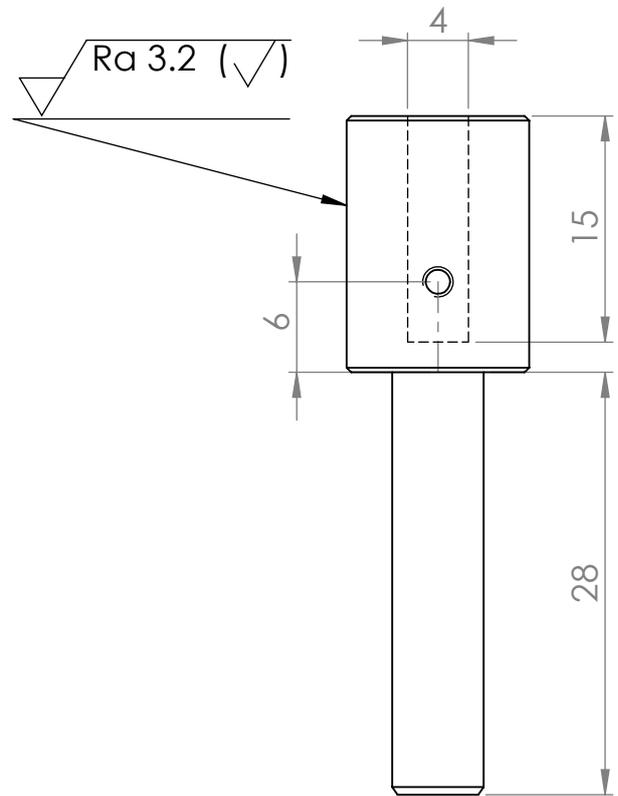
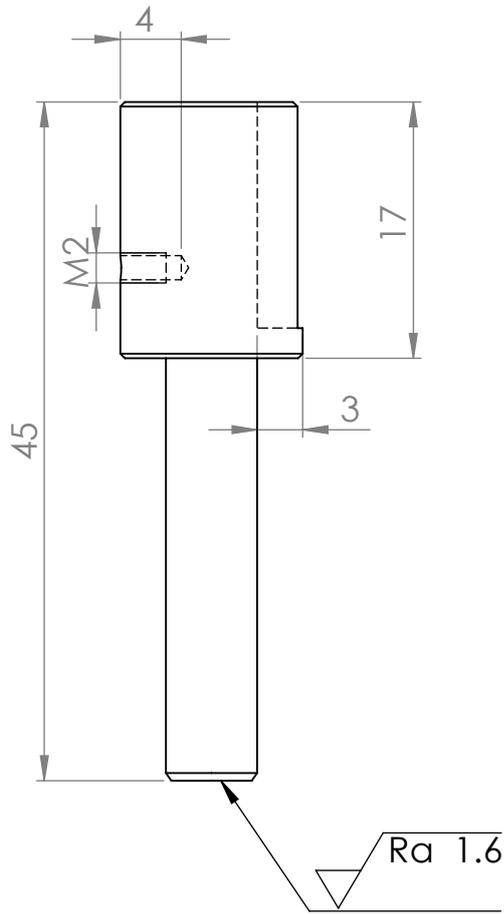
PORTE PIN

MATIERE

XC 35

ENP
G.MECANIQUE

TOLERANCE GENERALE 0.1



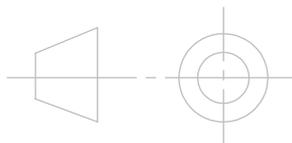
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle

1:1

Etudiant

promoteur



AMMALI

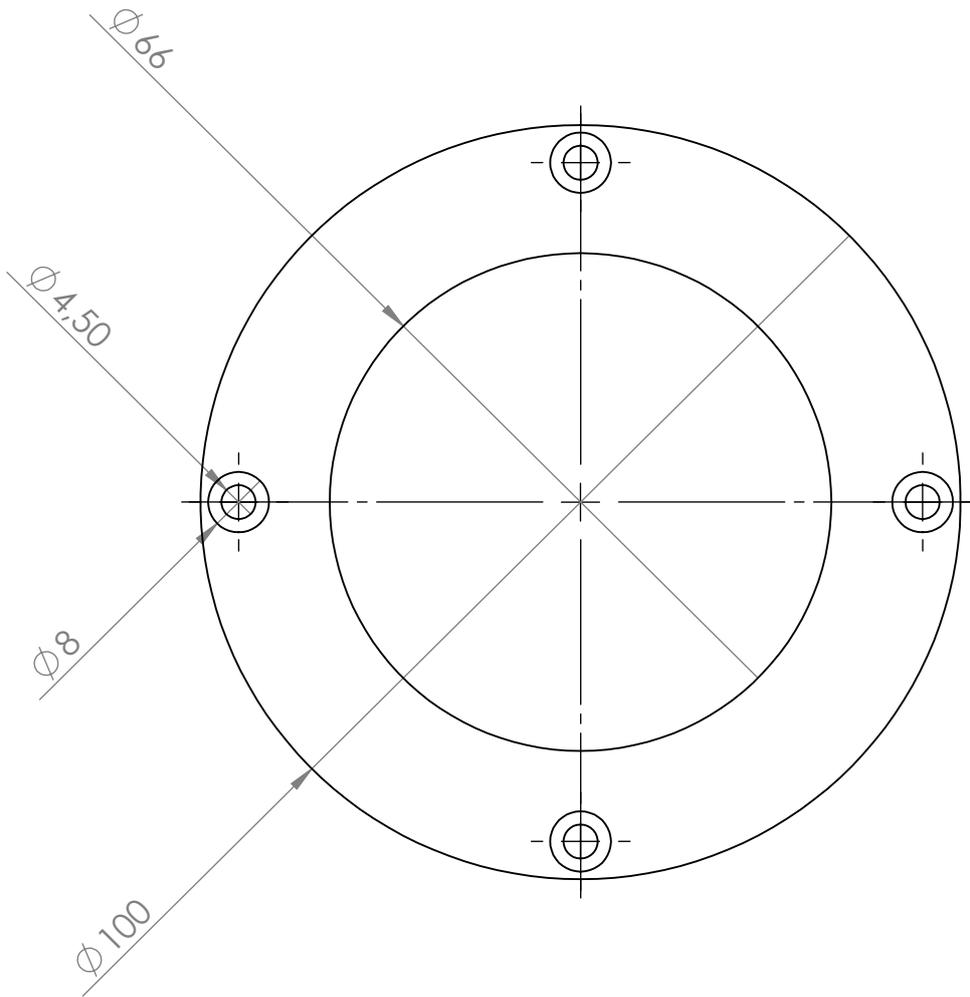
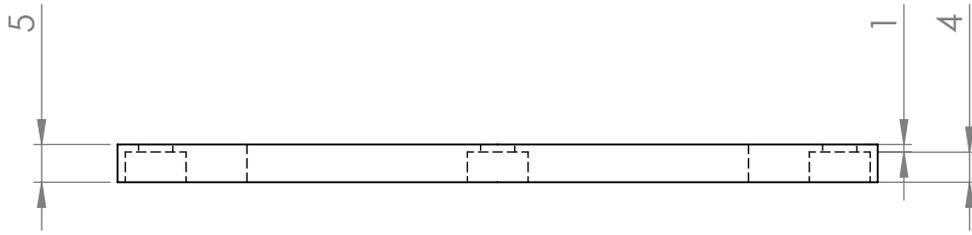
BELHADEF

PION

MATIERE

XC 35 TRAITE

ENP
G.MECANIQUE



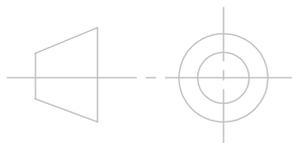
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle

1:1

Etudiant

promoteur



COUVERCLE
TRANSLATION
SHOULDER

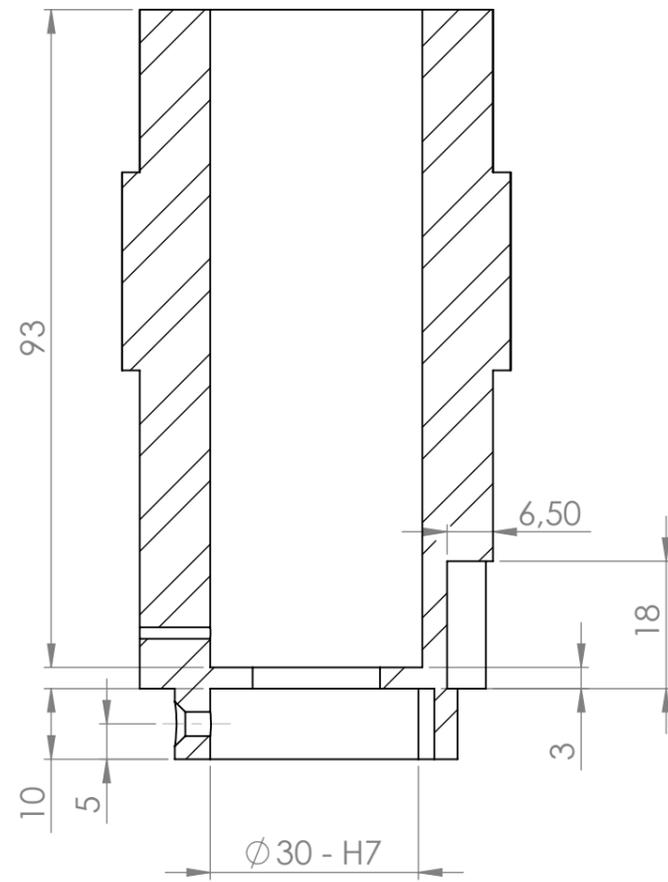
AMMALI

BELHADEF

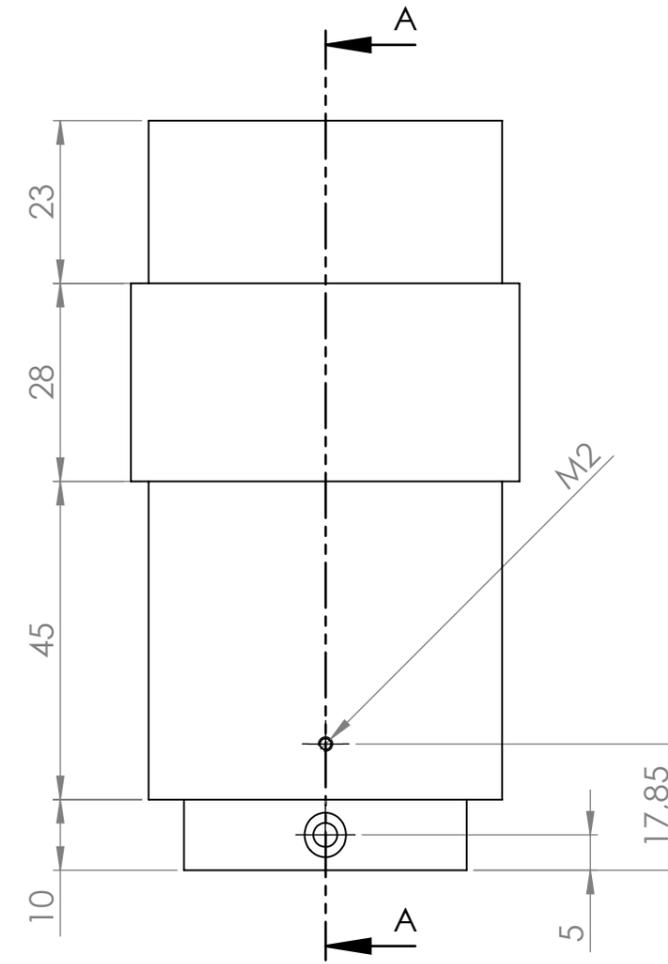
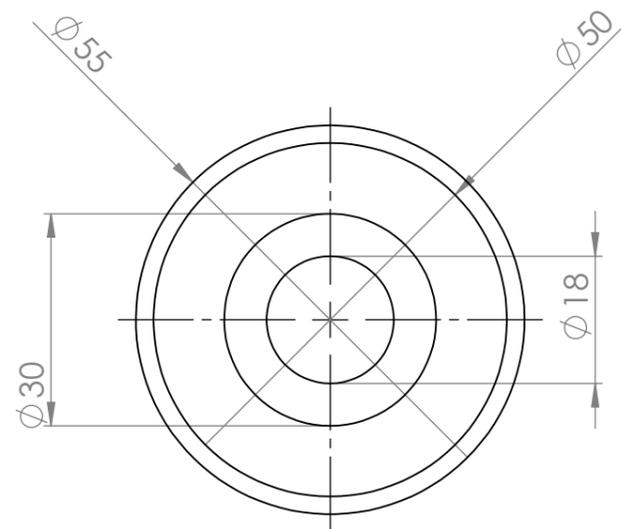
MATIERE

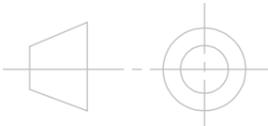
ENP
G.MECANIQUE

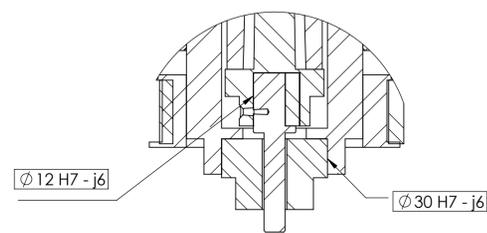
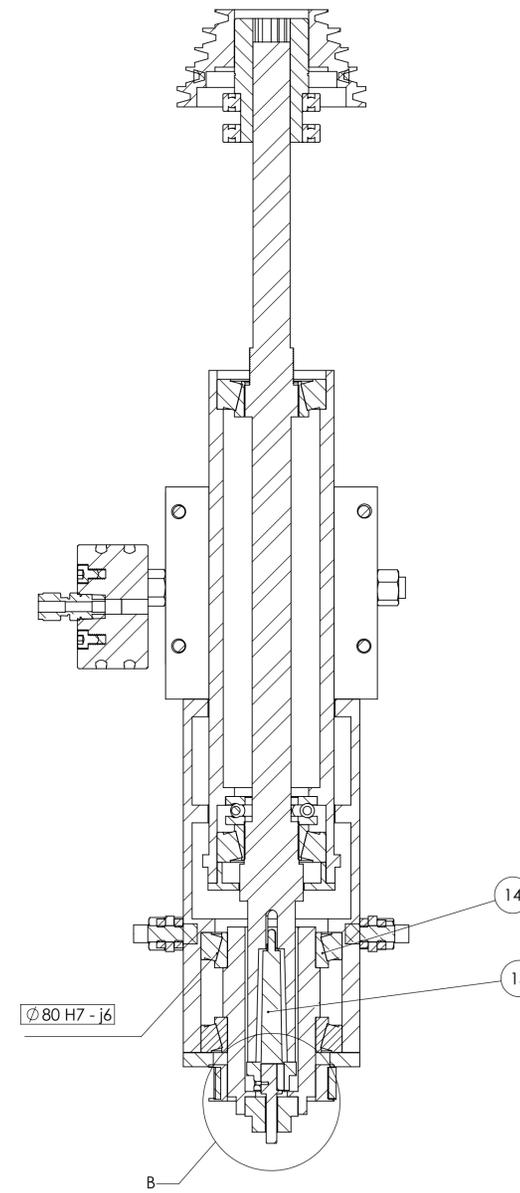
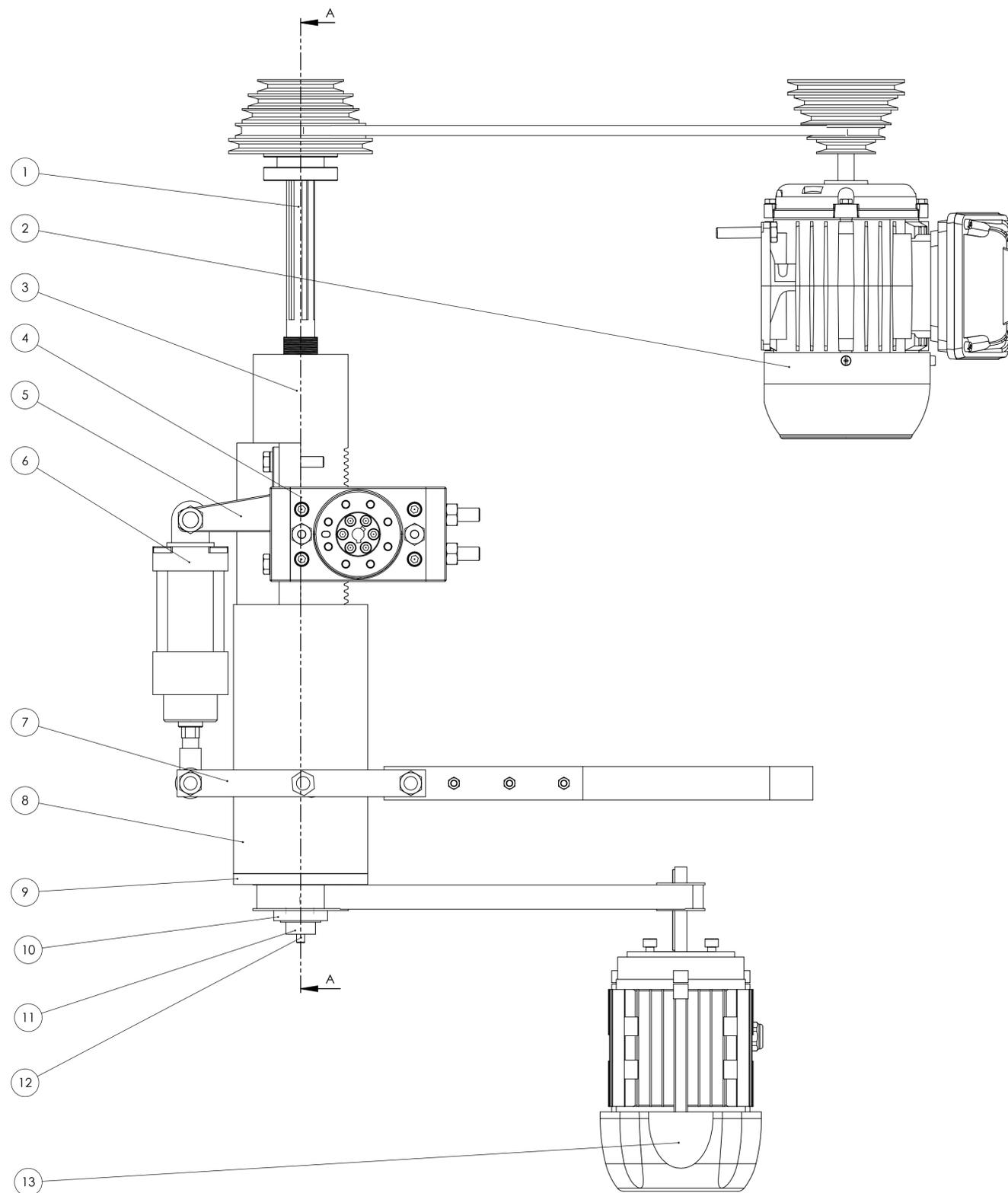
Tolérance Générale: 0.1



COUPE A-A



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			ENP G.MECANIQUE
Echelle		Porte shoulder 1	
1:1			
Etudiant	AMMALI	MATIERE	
promoteur	BELHADEF	XC35	



DÉTAIL B
ECHELLE 1 : 1

Numéro de la pièce	Désignation	QTE
1	Broche perceuse	1
2	Moteur Perceuse	1
3	Fourreau perceuse	1
4	Vérin rotatif	1
5	Support vérin linéaire	1
6	vérin linéaire	1
7	Pivot vérin	1
8	Porte shoulder 1	1
9	couvercle porte shoulder	1
10	Porte shoulder 2	4
11	Shoulder	4
12	Pion	1
13	13	7
14	SKF - 32010 X - 24,SI,NC,24	2
15	porte Pin	1

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle		Ensemble machine FSSW	ENP G.MECANIQUE
1:1			
Etudiant	AMMALI		
promoteur	BELHADEF		