



**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA -1-  
FACULTE DE TECHNOLOGIE.  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE.**

LABORATOIRE D'ETUDES ET DE RECHERCHE EN TECHNOLOGIE  
INDUSTRIELLE.

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique.

Option : Génie des Matériaux.

Spécialité : Ingénierie des Matériaux et des Surfaces.

**CONTRIBUTION A L'ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE  
DE SOUDAGE PAR FRICTION(RFW).**

Proposés et encadrés par :

Pr. ALLALI Abderrazak.

Dr. OTHMANI Boubaker.

Dr. MIMOUNI Oussama.

Réalisés par :

Mr. ABDOUNI Hamza.

Mr. TIR Abderraouf.

## **Remerciements**

*Louange à **ALLAH** le miséricordieux qui nous a donné la volonté, la santé et la patience pour finir ce modeste travail.*

*On tient à remercier vivement nos promoteurs le professeur **ALLALI Abderrazak**, et chef du département de mécanique ,faculté de technologie **Temmar mustapha** , université de Blida -1-ainsi que Mr **MIMOUN Oussama** Attaché de recherche aux niveau de centre de Recherche et Développement à Dar El Beida pour avoir dirigé ce travail et pour la confiance qu'ils nous ont témoignée en nous proposant ce sujet de fin d'études.*

*Ontient à témoigner notre reconnaissance envers nos aides du centre de Recherche et de Développement –Mécanique Aéronautique « **CRD/MA** »Dar El Beida, et en particulier, **Mr Youbi Boumediene**, sans oublier toutes les personnel de l'Entreprise de Maintenance de Matériels Aéronautiques « **ERMAéro** ».*

*On remercie les membres du jury pour avoir bien voulu accepter d'examiner et de juger mon travail.*

*Enfin, mes reconnaissances les plus sincères s'expriment aux personnes qui ont contribué de près ou du loin dans ce travail.*

## *Dédicace*

*C'est avec un très grand honneur que je dédie ce  
modeste travail, aux deux personnes qui se sont  
sacrifiées pour je grandisse avec un savoir-faire et  
qui m'ont appris à ne jamais baisser les bras, et qui  
ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui, sans  
lesquels je n'y serais jamais parvenu et qui je ne  
remercierais jamais assez ;*

*Mes très chers parents*

*A mes frères et sœurs*

*Et à tous mes amis et mes collègues.*

*ABDOUNI Hamza.*

## *Dédicace*

*Du profond de mon cœur Je dédie ce modeste travail  
à tous ceux qui me sont chers,*

*A la mémoire de mon père ; je ne saurais exprimer  
mon grand chagrin en ton absence ; que ce travail  
soit une prière pour le repos de ton âme.*

*A mon adorable mère j'implore mon dieu de vous  
accorder de bonne sante et longue vie.*

*A mes frères et mon adorable sœur.*

*A monsieur le professeur allali qui a eu un grand  
rôle dans ma réussite.*

*Et a tous mes amis.*

*Tir abderraouf.*

---

## *Résumé*

---

Le soudage par friction rotative (RFW) est un processus d'assemblage à l'état solide qui fonctionne en faisant tourner une pièce par rapport à une autre sous une force axiale de compression, ce qui produit la coalescence des matériaux des pièces. Il est considéré comme l'alternative la plus viable pour surmonter les difficultés rencontrées dans les techniques d'assemblage conventionnelles. Tel quel un procédé de soudage à l'état solide, le procédé ne forme pas de bain fondu en éliminant ainsi les erreurs de solidification. Il offre de nombreux avantages pour certains secteurs manufacturiers pour une large gamme d'applications. Dans cette recherche, nous étudions les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des assemblages soudés RFW pour homogénéité et assemblages hétérogènes. Nous avons étudié les aciers A60 et les alliages d'aluminium de la série 2017A. Les soudures obtenues sont similaires en apparence en ce sens qu'ils ont plusieurs zones microstructurales distinctes. Ainsi, les résultats montrent qu'en augmentation de la vitesse de rotation employant 1000 et 1600 tr / min, les propriétés mécaniques pendant le processus RFW est légèrement améliorée, favorisée par l'augmentation du flux de chaleur. Dans le même échantillon, la distribution de micro dureté est généralement légèrement changée entre la soudure par projection de la ligne centrale du tube soudé et près de leur limite ligne. Cela est dû à la non-uniformité de la distribution de la température dans la section transversale. Ainsi, la déformation plastique de la partie chauffée du métal joue un rôle important dans le processus de soudage par friction et leur qualité microstructurale. L'analyse révèle que la croissance des grains dans le joint WCZ et dans la zone affectée thermiquement HAZ en raison du non-uniforme de répartition du flux thermique dans les deux sens (transversal et longitudinal du tube). Enfin en utilisant RFW, les fabricants permettent de réaliser et de maintenir les composants mécaniques à faible coût et qu'ils conservent leur qualité de soudage par rapport au soudage par fusion classique. Le comportement vibratoire d'une barre en aluminium aéronautique et un alliage d'acier en présence d'un cordon de soudure RFW. On commence tout d'abord avec un rappel théorique sur le système de résolution d'une barre. Puis, on effectue une modélisation avec ABAQUS. Et finalement, une analyse modale expérimentale est établie. Les résultats à obtenir seront comparés dans les deux cas : absence et présence de la soudure. Des conclusions sont à tirer concernant les changements des propriétés dynamiques sous l'influence de la soudure RFW.

## ملخص

لحام الاحتكاك الدوراني (RFW) هو عملية تجميع في الحالة الصلبة تعمل عن طريق تدوير جزء واحد بالنسبة إلى آخر تحت قوة ضغط محورية، مما ينتج عنه اندماج مواد الجزء. يعتبر البديل الأكثر قابلية للتطبيق للتغلب على الصعوبات التي تواجه تقنيات التجميع التقليدية. كعملية لحام في الحالة الصلبة، لا تشكل العملية حوضاً منصهرًا وبالتالي تقضي على أخطاء التصلب وتوفر العديد من المزايا لقطاعات تصنيع معينة لمجموعة واسعة من التطبيقات. في هذا البحث، ندرس الخصائص الميكانيكية والمعدنية للوصلات الملحومة RFW من أجل التجانس والمفاصل غير المتجانسة. لقد درسنا فولاذ A60 وسبائك الألومنيوم لسلسلة A2017. اللحامات التي تم الحصول عليها متشابهة في المظهر من حيث أن لديها العديد من المناطق المجهرية المتميزة. وهكذا، أظهرت النتائج أنه من خلال زيادة سرعة الدوران التي تستخدم 1000 و1600 دورة في الدقيقة، فإن الخواص الميكانيكية أثناء عملية RFW تتحسن بشكل طفيف، ويفضلها زيادة تدفق الحرارة. في نفس العينة، عادةً ما يتم تغيير توزيع الصلابة الدقيقة بشكل طفيف بين لحام الإسقاط للخط المركزي للأنيوب الملحوم وبالقرب من خطها الحدودي. هذا بسبب عدم انتظام توزيع درجة الحرارة في المقطع العرضي. وبالتالي، فإن التشوه البلاستيكي للجزء المسخن من المعدن يلعب دوراً مهماً في عملية اللحام بالاحتكاك وجودته. البنية المجهرية: يكشف التحليل عن نمو الحبوب في مفصل WCZ وفي منطقة HAZ المتأثرة بالحرارة بسبب التوزيع غير المنتظم لتدفق الحرارة في كلا الاتجاهين (عرضي وطولي للأنيوب). أخيراً، باستخدام RFW، يتيح المصنعون إنتاج وصيانة المكونات الميكانيكية بتكلفة منخفضة والاحتفاظ بجودة اللحام مقارنة بلحام الانصهار التقليدي.

السلوك الاهتزازي لقضيب الألومنيوم للطائرة في وجود لحام RFW. نبدأ أولاً بتذكير نظري بنظام الدقة. بعد ذلك، يجري المرء نمودجة باستخدام ABAQUS. وأخيراً، تم إنشاء تحليل نمودجي تجريبي. ستتم مقارنة النتائج التي سيتم الحصول عليها في الحالتين: غياب وجود اللحام. سيتم استخلاص استنتاجات بشأن التغييرات في الخصائص الديناميكية تحت تأثير اللحام RFW.

---

## *Abstract*

---

Rotary Friction Welding (RFW) is a solid-state assembly process that works by rotating one part relative to another under an axial compressive force, which produces coalescence of the part materials. It is considered the most viable alternative to overcome the difficulties encountered in conventional assembly techniques. As a solid-state welding process, the process does not form a molten pool thereby eliminating solidification errors and offers many advantages manufacturing sectors for a wide range of applications. In this research, we study the mechanical and metallurgical characteristics of RFW welded joints for homogeneity and heterogeneous joints. We have studied the A60 steels and the aluminum alloys of the 2017A series. The welds obtained are similar in appearance in that they have several distinct microstructural areas. Thus, the results show that by increasing the rotational speed employing 1000 and 1600 rpm, the mechanical properties during the RFW process are slightly improved, favored by the increased heat flow. In the same sample, the micro hardness distribution is usually slightly changed between the projection weld of the centerline of the welded tube and near their borderline. This is due to the non-uniformity of the temperature distribution in the cross section. Thus, the plastic deformation of the heated part of the metal plays an important role in the process of friction welding and their quality. Microstructural. Analysis reveals grain growth in the WCZ joint and in the heat affected HAZ zone due to the non-uniform distribution of heat flow in both directions (transverse and longitudinal of the tube). Finally, by using RFW, manufacturers make it possible to produce and maintain mechanical components at low cost and retain their welding quality compared to conventional fusion welding.

The vibratory behavior of an aircraft aluminum bar in the presence of an RFW weld. We start first with a theoretical review of the resolution system. Then, one carries out a modulization with ABAQUS. Finally, an experimental modal analysis is established. The results to be obtained will be compared in the two cases: absence and presence of the weld. Conclusions will be drawn regarding changes in dynamic properties under the influence of RFW welding.

# Table de matières

<b>REMERCIEMENTS :</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICACES :</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUME :</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX:</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS.....</b>	<b>X</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I :                   GENERALITES SUR LE SOUDAGE.</b>	
1.1    Introduction :.....	4
1.2    Historique sur le soudage:.....	4
1.3    Caracteristiques mécaniques des soudées :.....	5
1.4    Definition du soudage :.....	5
1.5    Différents procédés du soudage :.....	6
1.5.1   Le Soudage Oxyacéthylique :.....	8
1.5.2   Soudage à l'arc électrique:.....	9
1.5.3   Soudages plasma :.....	12
1.5.4   Soudage par résistance:.....	13
1.5.5   Soudage par faisceau d'électrons:.....	15
1.5.6   Soudage laser:.....	16
1.5.7   Soudage électro gaz:.....	16
1.5.8   Soudage par friction:.....	17
1.5.9   Soudage par friction-malaxage :.....	18
1.6    Conclusion :.....	19

## **CHAPITRE II : ETUDE DE SOUDAGE PAR FRICTION.**

2.1	Introduction :.....	20
2.2	Définition :.....	20
2.2.1	Principe :.....	22
2.2.2	Différentes phases opératoires de soudage par friction :.....	23
2.2.3	Cycle de soudage :.....	23
2.3	Caractéristiques mécaniques :.....	24
2.4	Machines a soudé :.....	26
2.5	Avantages du soudage par friction :.....	28
2.6	Limites du soudage par friction :.....	28
2.7	Domaines d'application :.....	29
2.8	Etude expérimentale est élaborée en vue de déterminer les caractéristiques structurales 1joint soudé par friction(Acier A 60 et Alumunium 2017 A) :.....	32
2.8.1	Procédure expérimentale:.....	32
2.8.2	Résultats et discussions :.....	37
2.9	Conclusion :.....	40

## **CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE.**

3.1	Présentation de l'environnement ABAQUS :.....	41
3.1.1	Etapas de traitement par de logiciel ABAQUS :.....	42
3.2	Etapas de modélisation :.....	43
3.2.1	Plateforme de simulation et d'exécution :.....	
3.2.2	Barre de référence :.....	
3.3	Résultats :.....	47
3.3.1	Cas de la barre de référence (non soudée) :.....	47
3.3.2	Cas de la barre soudée:.....	49
3.3.3	Troisième mode :.....	50
3.4	Interprétation :.....	51

3.5	Conclusion :.....	51
-----	-------------------	----

**CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE.**

4.1	Principe :.....	52
-----	-----------------	----

4.2	Technique de mesure :.....	52
-----	----------------------------	----

4.3	Matériels et logiciels utilisés :.....	52
-----	--	----

4.3.1	Présentation du matériel utilisé :.....	52
-------	---	----

4.3.2	Acquisition & traitement des signaux :.....	55
-------	---	----

4.4	Partie expérimentale :.....	58
-----	-----------------------------	----

4.4.1	But de l'étude :.....	58
-------	-----------------------	----

4.4.2	Étapes d'analyse modale expérimentale :.....	59
-------	--	----

4.4.3	Détermination des paramètres modaux :.....	62
-------	--	----

4.5	Résultats expérimentaux et discussion :.....	68
-----	--	----

4.6	Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques :.....	69
-----	--	----

4.7	Conclusion :.....	69
-----	-------------------	----

<b>Conclusion générale et Perspectives.....</b>		<b>70</b>
---	--	-----------

<b>Bibliographies:.....</b>		<b>LXXIII</b>
-----------------------------	--	---------------

<b>Annexes :.....</b>		<b>LXXV</b>
-----------------------	--	-------------

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I-1 : Assemblage de deux pièces par soudage.....</b>	<b>6</b>
<b>Figure I-2 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.....</b>	<b>7</b>
<b>Figure I-3: Flamme.....</b>	<b>9</b>
<b>Figure I-4 :Principe de la soudure à l'arc électrique.....</b>	<b>10</b>
<b>Figure I-5 : Principe des soudages MIG et MAG.....</b>	<b>11</b>
<b>Figure I-6 :Principe du soudage TIG.....</b>	<b>11</b>
<b>Figure I-7 : Principe du coupage plasma.....</b>	<b>13</b>
<b>Figure I-8 :Principe du soudage par point.....</b>	<b>14</b>
<b>Figure I-9 : Principe du soudage par molette.....</b>	<b>14</b>
<b>Figure I-10 : Schéma de principe du soudage par faisceau d'électrons.....</b>	<b>15</b>
<b>Figure I-11 : Schéma de principe du soudage laser.....</b>	<b>16</b>
<b>Figure I-12 : Schéma signifie le principe de soudage électro-gaz.....</b>	<b>17</b>
<b>Figure I-13 : Principe du soudage par frottement.....</b>	<b>18</b>
<b>Figure I-14 : Soudage par friction-malaxage.....</b>	<b>18</b>
<b>Figure II-1 : Soudage par friction ; (a) schéma d'une machine de soudage par friction, (b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydraulique.....</b>	<b>21</b>
<b>FigureII.2 : Principe de soudage par friction.....</b>	<b>22</b>
<b>Figure II-3 : Chronologie d'une opération de soudage par friction.....</b>	<b>23</b>
<b>Figure II-4 : Cycle de soudage par friction.....</b>	<b>25</b>
<b>Figure II-5 : Pièce d'un turbo.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure II-6 : Partie d'une boîte de vitesse.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure II-7 :Partie d'un amortisseur :tubehydraulique le tube Soudé à une pièce compressée .....</b>	<b>30</b>

<b>Figure II-8 :Partie d'un cric à double paroi est soudé en une fois.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure II-9 :Soudage de tiges de piston.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure II-10 :Production de boulons crochet.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure II-11 :Soudagedes roues dentées d'une boîte de vitesse.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure II-12 : Fixation d'une bride à une valve hydraulique .....</b>	<b>31</b>
<b>Figure II-13 : Remplacement de piècesforgées ou coulées par des profilés standards soudés par friction .....</b>	<b>31</b>
<b>Figure II-14 : Piston d'un moteur diesel.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure II-15 : Arbres de transmission soudés par friction.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure II-16 : Schema de l'installation experimentale de soudage et ces instruments....</b>	<b>33</b>
<b>Figure II-17 : a, b, c.Quelques étapes de préparations et caractérisations.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure II-18 : Courbes d'essai de traction des éprouvettes soudées et comparées au métal de base BM de : a) Acier A60, b) Aluminium 2017A.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure II-19 : Micrographie optique en acier A60 de : a) Le BM, b) le HAZ.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure II-20 : Évolution de la micro dureté :a) de l'acier A60, b)de l'aluminium 2017A.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure II-21 : Micrographie optique en alliage 2017A de : a) la zone de soudure et la ZATM, b) le BM.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III- 1 Diagramme de fonctionnement de l'ABAQUS.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure III- 2 Configuration du matériau.....</b>	<b>44</b>
<b>Figure III- 3 Maillage de la barre de référence (non soudée).....</b>	<b>44</b>
<b>Figure III- 4 Maillage de la barre soudée.....</b>	<b>45</b>
<b>Figure III- 5 Fixation d'une extrémité de la barre.....</b>	<b>46</b>
<b>Figure III- 6 Choix du type de simulation (fréquentielle).....</b>	<b>46</b>
<b>Figure III- 7 Mode propre d'ordre 1.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure III- 8 Mode propre d'ordre 2.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure III- 9 Mode propre d'ordre 3.....</b>	<b>48</b>

<b>Figure III- 10 Barre soudée.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure III- 11 Mode propre d'ordre 1 (plaque soudée).....</b>	<b>49</b>
<b>Figure III- 12 Mode propre d'ordre 2 (plaque soudée).....</b>	<b>50</b>
<b>Figure III- 13 Mode propre d'ordre 3 (plaque soudée).....</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV- 1 Marteau d'impact.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure IV- 2 Types d'embouts.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure IV- 3 Accéléromètre (Wilcoxon 736T).....</b>	<b>54</b>
<b>Figure IV- 4 Système d'analyse modale expérimentale.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure IV- 5 Carte d'acquisition &amp; block de connexion.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure IV- 6 Logiciel PUMA.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure IV- 7 Logiciel CATSMODAL.....</b>	<b>58</b>
<b>Figure IV- 8 Barre (2017A) non soudé.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure IV- 9 Barre (2017A) soudée.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure IV- 10 Barre acier (A60) non soudée.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure IV- 11 Barre acier (A60) soudée.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure IV- 12 Réglages des sensibilités (capteur et marteaux) et leurs emplacements....</b>	<b>60</b>
<b>Figure IV- 13 Paramètres d'acquisition.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV- 14 Excitation de la barre.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV- 15 Signal d'excitation &amp; FRF.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV- 16 Importation des fichiers des FRFs.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV- 17 Lissage des courbes.....</b>	<b>63</b>
<b>Figure IV- 18 Paramètres modaux.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV- 19 Lissage des courbes.....</b>	<b>66</b>
<b>Figure IV- 20 Paramètres modaux.....</b>	<b>66</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau II-1 : Caractéristiques techniques de la machine à souder.....</b>	<b>21</b>
<b>Tableau II-2 : Caractéristiques techniques du soudage par friction.....</b>	<b>25</b>
<b>TableauII-3 : Soudabilité des métaux et alliages les plus couramment utilisés en soudage par friction.....</b>	<b>25</b>
<b>Tableau II-4 : Caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée.....</b>	<b>26</b>
<b>Tableau II-5 : Caractéristiques générales de la machine.....</b>	<b>33</b>
<b>Tableau II-6 :Compositionschimiques de 2017A et les pourcentages des éléments aditifs.....</b>	<b>34</b>
<b>Tableau II-7 : Propriétés mécaniques de l'alliage 2017A.....</b>	<b>34</b>
<b>Tableau II-8 Composition chimique de l'acier A60 en pourcentage en poids.....</b>	<b>34</b>
<b>Tableau II-9 Propriétés mécaniques de l'acier A60.....</b>	<b>35</b>
<b>Tableau III- 1 Caractéristiques de l'ordinateur de simulation.....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau III- 2 Propriétés et statistiques de la barre de référence.....</b>	<b>45</b>
<b>Tableau III- 3 Propriétés et statistiques de la barre soudée.....</b>	<b>45</b>
<b>Tableau III- 4 Comparaison entre les valeurs des fréquences propres.....</b>	<b>51</b>
<b>Tableau IV- 1 Caractéristiques techniques du marteau d'impact.....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau IV- 2 Caractéristiques techniques, accéléromètre (Wilcoxon 736T).....</b>	<b>55</b>
<b>Tableau IV- 3 Déformées appropriés aux différents modes propres de barre non soudée.....</b>	<b>65</b>
<b>Tableau IV- 4 Déformées appropriés aux différents modes propres de barre soudée.....</b>	<b>67</b>
<b>Tableau IV- 5 Résultats expérimentaux.....</b>	<b>68</b>
<b>Tableau IV- 6 Résultats expérimentaux et numériques.....</b>	<b>69</b>

## **LISTE DES ABREVIATIONS.**

### **Liste des abréviations :**

CRD-MA	Centre Recherche Développement –Mécanique Aéronautique.
ERM-Aéro	Entreprise de Rénovation de Matériels Aéronautique.
RFW	Rotary Friction Welding
FSW	Friction Stir Welding.
TIG	Tungsten Inert Gas.
MIG/ MAG	Métal Inert/Active Gas.
MB	Métal de Base.
ZAT	Zone Affectée Thermiquement.
ZATM	Zone Affectée Thermo-mécaniquement.
AME	Analyse modale expérimentale.
FRF	Fonction de réponse en fréquence.

## INTRODUCTION GENERALE

Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffage résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global 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 principe est comme suit : Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation. Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial déterminé. Par frottement les pièces s'échauffent de part et d'autre du plan de joint ( $V = 100 \text{ m/min}$ ).

Vitesse de friction : physiquement, pour un matériau et une pression donnée, le couple passe par un maximum en fonction de la vitesse. Ces conditions sont à déterminer dans un essai préalable exécuté sur un assemblage tubulaire de diamètre donné. Ainsi, pour les aciers en général, on obtient une vitesse de  $2 \text{ m/s}$  pour un effort de  $5 \text{ daN/mm}^2$ . Pour appliquer ces valeurs à une section pleine de diamètre  $D$  pour laquelle les vitesses de friction vont varier de zéro, au centre, au maximum à la périphérie, on choisit un diamètre dit de friction à  $2 D/3$ .

En pratique, pour une section pleine en acier, la diffusion thermique transversale intervient favorablement dans le temps total de friction. La valeur ci-dessus n'est pas critique et cela permet de disposer de machines standards dont la vitesse de rotation est fixée par construction ou réglable par paliers pour être globalement en rapport avec la section à souder et la capacité de la machine. Dans le cas de pièces tubulaires, la vitesse doit être déterminée de façon plus précise en fonction du diamètre moyen.

Durée de friction : elle est déterminée expérimentalement et mise en évidence. Un temps trop court fournit une zone affectée thermiquement irrégulière ; en revanche, un temps trop long entraîne une consommation de métal surabondante.

Un bourrelet commence à se former. Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté. C'est la phase de forgeage de la soudure qui se traduit par la formation d'un bourrelet très caractéristique. On élimine ensuite ce bourrelet par usinage.

Ce procédé est appliqué pour les mécanismes nécessitant une grande résistance. On trouve comme exemples : Arbres de transmission ; Engrenages ; Goujons sur moyeu ; Tige de piston etc.

Soit la simulation du procédé de soudage par friction. D'après sa définition Générale. Le soudage est défini comme étant une opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutive d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport

Cette étude contribue à la modélisation numérique du soudage par friction pour l'identification des paramètres de soudage, la modélisation repose sur le calcul de la quantité de chaleur générée par le frottement et sur la répartition spéciale de la chaleur en tenant compte des variations des propriétés thermique du matériaux.

Cette étude nécessite une attention particulière des étapes citées ci-dessous :

Fabrication des joints soudés par friction.

Etude des paramètres de soudage optimaux, dont le but d'avoir des soudures avec un minimum des défauts détecter par les méthodes de contrôle non destructif et leur caractérisation à savoir :

- \*Vitesse de friction.
- \*Durée de friction.
- \*Effort de friction.
- \*Effort et durée de forgeage.
- \*Présentation des éprouvettes.
- \*Dimensions, Matériaux, Usinage des éprouvettes.
- \*Essais des éprouvettes.
- \*Essai d'ultra-son.
- \*Essai de traction.

Etude des comportements dynamique des deux barres (soudés et non soudés) avec deux méthodes : Simulation numérique l'aide d'1 **logiciel ABAQUS** et analyse modale expérimentale sous une plateforme **Spectral Dynamics**.

## **Plan du travail :**

INTRODUCTION GÉNÉRALE.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SOUDAGE.

CHAPITRE II : ETUDE DE SOUDAGE PAR FRICTION.

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE.

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

*Chapitre 1 :*

*Generalites sur le  
soudage.*

## 1-1 INTRODUCTION AU SOUDAGE :

Un **assemblage mécanique** est la liaison de différentes pièces d'un ensemble ou produits. C'est aussi un ensemble de procédés et solutions techniques permettant d'obtenir ces liaisons. Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression.[1].

Par son succès industriel, elle présente les avantages suivants :

Faciliter de mise en œuvre ;

Moins de travail ;

Économie de matière ;

Meilleure solution technique.

## 1-2 Historique sur le soudage :

Les origines du soudage moderne datent la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et du début de 20<sup>ème</sup> siècle. Le soudage de nos jours Nous n'estimons aujourd'hui que (60 à 80) % de la production mondiale de l'acier soient destinés à la fabrication des produits soudés. A noter que le soudage est particulièrement utilisé dans les domaines de la fabrication des assemblages métallique à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydraulique. Actuellement nous avons la possibilité de des éléments d'épaisseur de 0.01mm jusqu'à 1000 mm et même plus en bref, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés dans les techniques modernes. Les procédés de soudage appelés soudage de rechargement existent aussi et sont Largement utilisés pour la remise en état de pièces et assemblage usés ou endommagés. Le développement actuel des procédés de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipement), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie telle que le LASER.[2].

## **1-3 Caractéristiques mécaniques des soudées :**

Parmi les caractéristiques mécaniques que doivent remplir les pièces à souder, on trouve la soudabilité, la conductivité thermique, la résistance à la déformation thermique, ...etc. A ce point, on s'intéresse à l'explication de la soudabilité comme étant le facteur principal dans toute opération de soudure.

## **Que-est-ce que la soudabilité ?**

Pour que deux pièces soient soudées, elles doivent remplir une condition essentielle, il s'agit de la soudabilité qui est la propriété que possèdent certains corps, de s'unir par la soudure, opération fréquemment appliquée dans le travail des métaux et qui consiste à rapprocher intimement deux corps de même nature, ou d'une nature différente, de façon à n'en former qu'un seul. [3].

## **1-4 Définition du soudage:**

le soudage est un moyen d'assemblage de pièces de manière permanente. Une technique qui permet la continuité métallique entre les pièces soudées. Il existe 03 types de soudures :

- Soudure homogène : Métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature.
- Soudure hétérogène de type A : Association de métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- Soudure hétérogène de type B : Métaux de base et le métal d'apport sont de nature différentes.

Selon les caractéristiques des matériaux à souder, l'énergie du soudage sera différente. Ce guide pratique se propose de passer en revue les principaux procédés de soudage ainsi que le matériel requis et les équipements individuels de protections propres aux soudeurs.

La figure I.1 montre l'assemblage de deux pièces par soudage. [4].

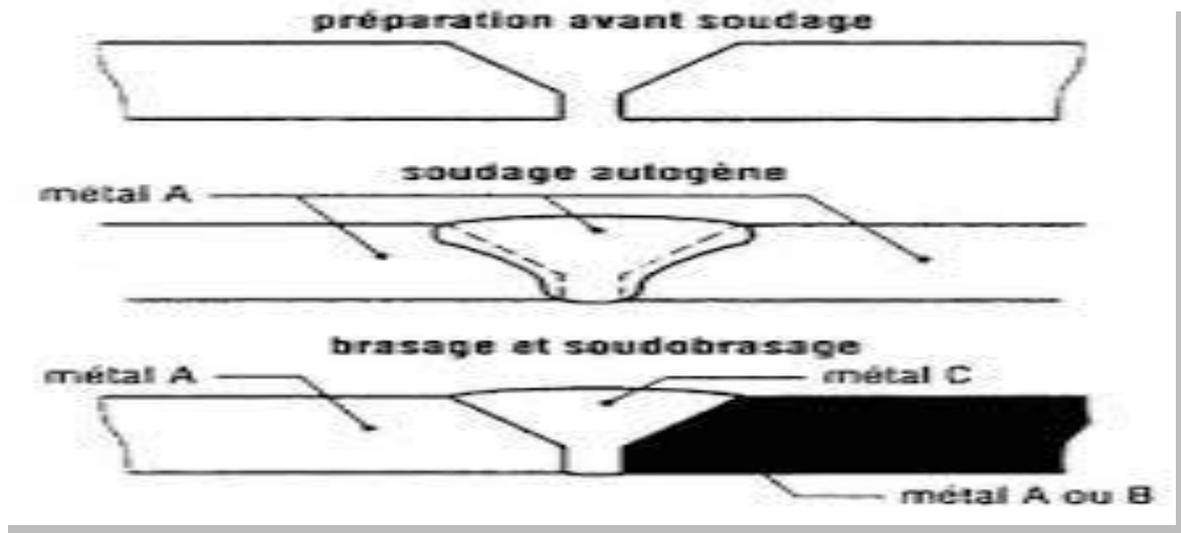


Figure I-1 : Assemblage de deux pièces par soudage.

**Autogène** : Fusion du métal de base et du métal d'apport.

**Hétérogène** : Métal de base n'est pas fondu, il n'y a que le métal d'apport qui est fondu (Soudo-brasage, brasage).

## 1-5 Différents procédés du soudage :

Le soudage étant un domaine très vaste, et les procédés sont nombreux au point qu'on ne peut pas tout étudier dans ce chapitre, alors, on s'est basé sur la description succincte de quelques procédés les plus connus.

On estime qu'il y a une quarantaine ou une cinquantaine de procédés de soudage au total. La figure I.1 présente un organigramme des procédés de soudage les plus répandus. Les procédés de soudage se subdivisent en deux grands groupes, en l'occurrence les procédés de soudage par fusion et les procédés de soudage par pression.

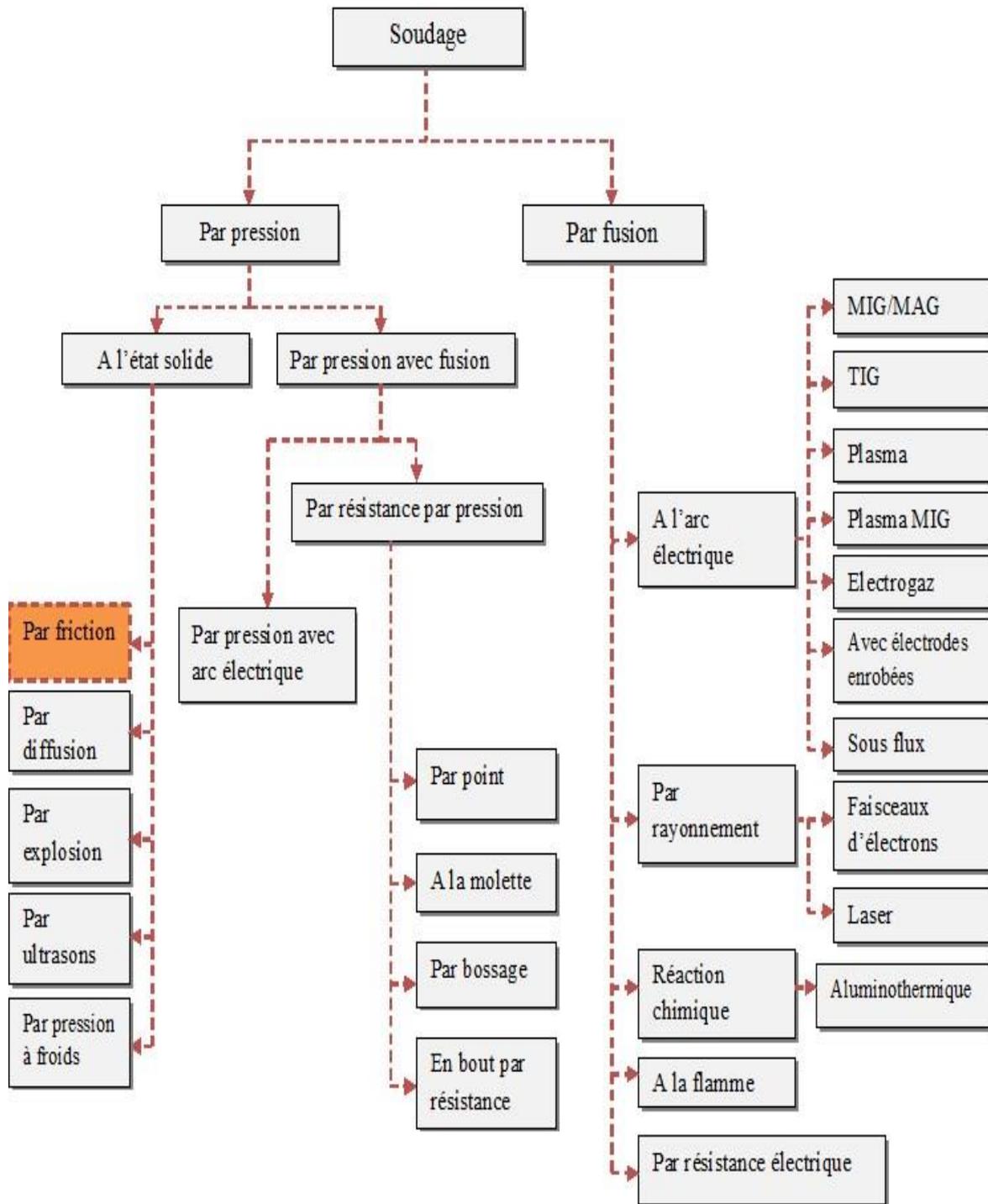


Figure I-2 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.

## **1-5-1 Soudage Oxyacéthylique :**

### **1-5-1-1 Définition du soudage OA, ou soudage oxyacéthylique, ou soudage chalumeau :**

Le soudage Oxyacéthylique est un procédé de soudure à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible l'acétylène  $C_2H_2$  avec un gaz comburant d'oxygène  $-O_2$ . La température de la flamme peut atteindre les  $3200^\circ$  Celsius, lorsque le mélange  $C_2H_2$  et  $O_2$  est correctement équilibré dans le chalumeau. Le métal d'apport est amené manuellement dans le bain de fusion.

On peut souder « en bord à bord »

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.[7].

### **1-5-1-2 Principe du soudage OA :**

- Mélange deux gaz, l'oxygène et l'acétylène.
- Enflamme le mélange.
- Obtient alors, après réglage une flamme nous permettant de souder.

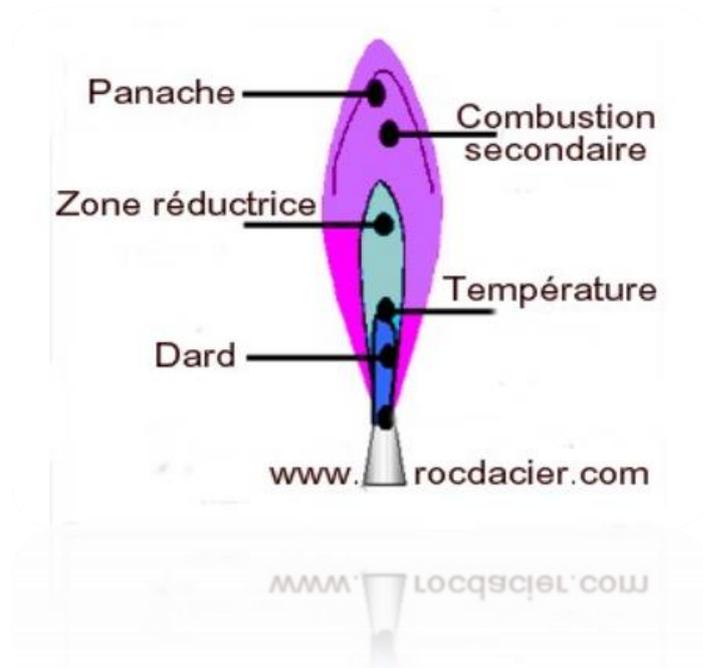
Le chalumeau de soudage est relié par des tuyaux à la bouteille de gaz combustible D'acétylène (pression de service 0,25 bar), Et à la bouteille de gaz comburant d'oxygène (pression de Service 3,5 bar) Un manodétendeur placé sur chaque Bouteille avec un dispositif de sécurité d'anti-retour régule La pression et l'arrivée des gaz.

### **1-5-1-3 Mode opératoire :**

- 1-Ouvrir les vannes d'acétylène et d'oxygène
- 2-Régler les pressions sur le manomètre : Oxygène 1,5 bars et Acétylène 0,5 bars
- 3-Ouvrir le robinet d'acétylène d'1/8 de tour sur le chalumeau
- 4-Allumer le chalumeau
- 5-Ouvrir l'oxygène et régler suivant la flamme désirée

## 1-5-1-4 Flamme :

Pour vérifier les défauts lors du Brasage



La flamme est composée de 3 zones :

- Le dard
- La zone réductrice
- Le panache

Figure I-3: Flamme.

## 1-5-1-5 Température de flamme chalumeau :

La température de la flamme n'est pas identique dans ces 3 zones.

La température maxi atteint 3100°C à 5 mm du dard.

## 1-5-2 Soudage à l'arc électrique :

### 1-5-2-1 Principe :

Comme le montre la figure (I.4), le soudage à l'arc est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder.

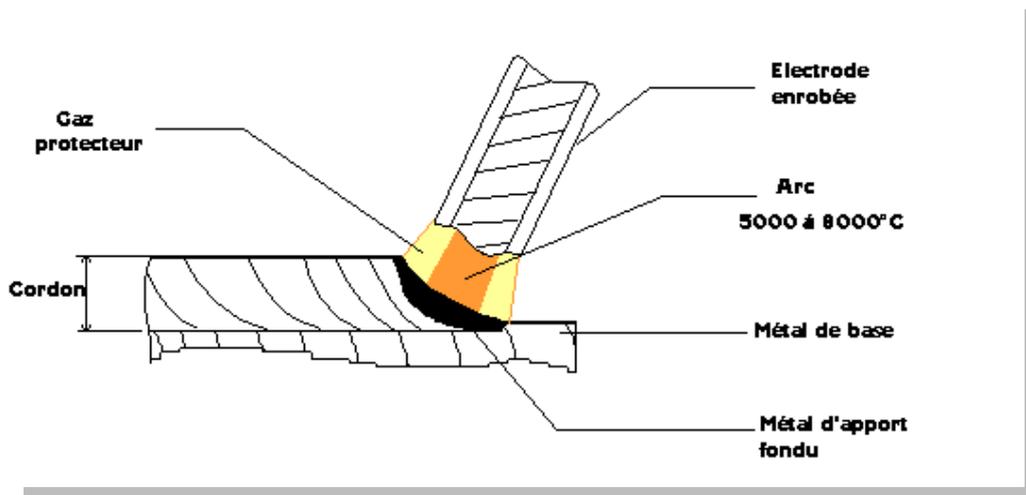


Figure I-4 : Principe de la soudure à l'arc électrique.

## 1-5-2-2 Techniques du soudage à l'arc électrique :

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

### a) Soudage à l'électrode enrobée :

L'électrode, dirigée manuellement est fusible et fournit le métal d'apport. L'enrobage assure un rôle protecteur et son épaisseur permet de jouer sur la forme du cordon, concave ou convexe (Voir schéma précédant). [5].

### b) Soudage MIG (Métal Inerte Gaz):

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit. Il utilise une électrode fusible (Fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (Gaz protecteur : Argon, Argon + Hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion. [5].

### c) Soudage MAG (Métal Active Gaz) :

C'est une variante du soudage MIG utilisant un mélange de gaz carbonique  $CO_2$  et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone. La figure I.5 montre le principe des soudages par MIG et MAG.

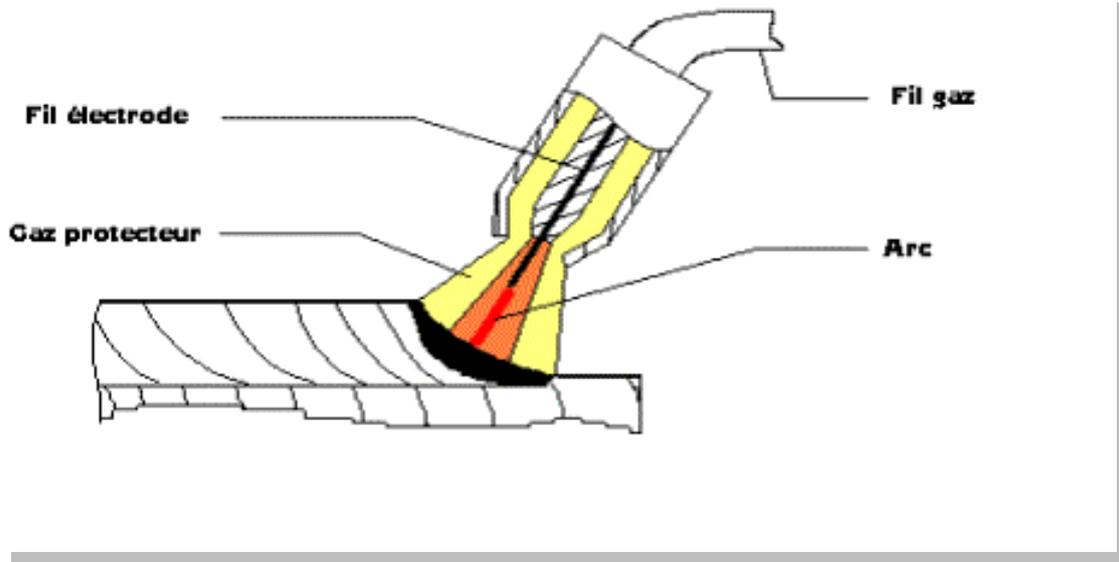


Figure I-5 : Principe des soudages MIG et MAG.[10].

**d) Soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) :**

Variante des précédents, plus productive et utilisant une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (Baguette) ou automatiquement (Fil déroulé). Il convient bien aux faibles épaisseurs (0.20 à 3 mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points (Voir soudage par résistance).[5]. On trouve dans la (Figure I.6) le principe du soudage TIG.

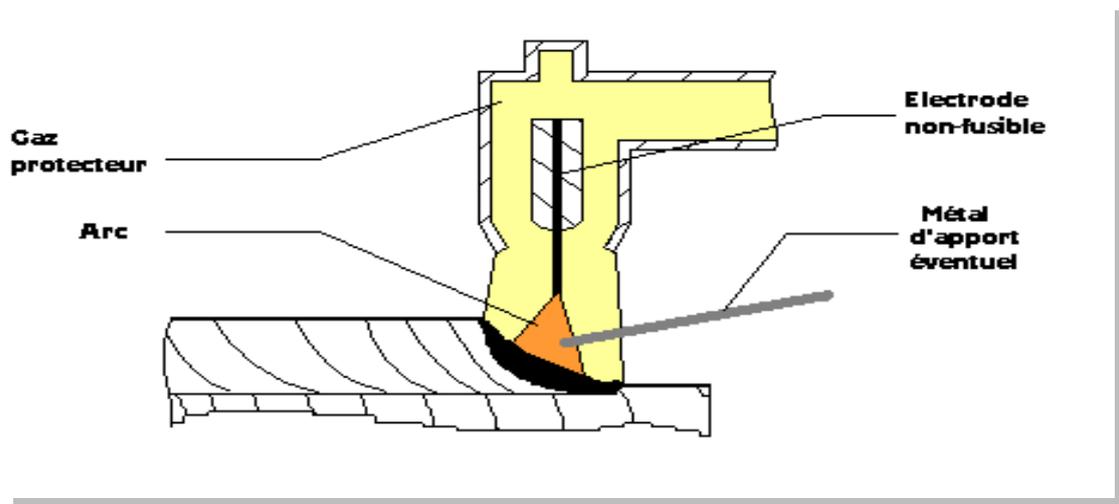


Figure I-6 Principe du soudage TIG.[11].

## ➤ Domaines d'application :

Ce procédé est très utilisé dans l'industrie, car son procédé de fusion entraîne moins de déformations que le chalumeau. Il est employé dans la construction mécano-soudée, la chaudronnerie, les charpentes métalliques, les chantiers navales, l'industrie automobile, le nucléaire, l'aérospatiale. [5].

## ➤ Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés selon le type de soudage ; on trouve pour :

- \*Soudage MIG (Métal Inerte Gaz) : Aciers inoxydables, Aluminium, Cuivre.
- \*Soudage MAG (Métal Active Gaz) : Aciers ordinaires.
- \*Soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) : Suivant le type de courants électrique :
- \*Courant continu : symbole DC : Aciers ordinaire, Aciers inoxydables, Cuivre, Titane...
- \*Courant alternatif symbole ~ AC : Aluminium.

## 1-5-3 Soudages plasma :

### 1-5-3-1 Principe :

Le principe de la soudure à l'arc tient dans le principe de l'élévation de température au point de fusion par l'utilisation d'un arc électrique. C'est l'échauffement créé par la résistivité des métaux parcourus par l'électricité qui élève la température au point de soudure jusqu'à celle requise pour la fusion du métal. Basé sur l'évolution de la soudure TIG et de la soudure MIG, la soudure plasma nécessite un gaz supplémentaire qui mélangé au gaz principal élève notablement la température de soudage jusqu'à l'effet plasmatique.

En conséquence, si le soudage plasma utilise une électrode en tungstène non fusible comme pour le soudage TIG, ou un fil fusible continu comme pour la soudure MIG, celle-ci est protégée par une buse en cuivre qui est en permanence refroidie à l'eau pour éviter sa fusion.[6].

Cette buse canalise d'une part le gaz initial en position centrale et d'autre part le second gaz en position annulaire. (Voir Figure I-7).

## PRINCIPE DU COUPAGE PLASMA

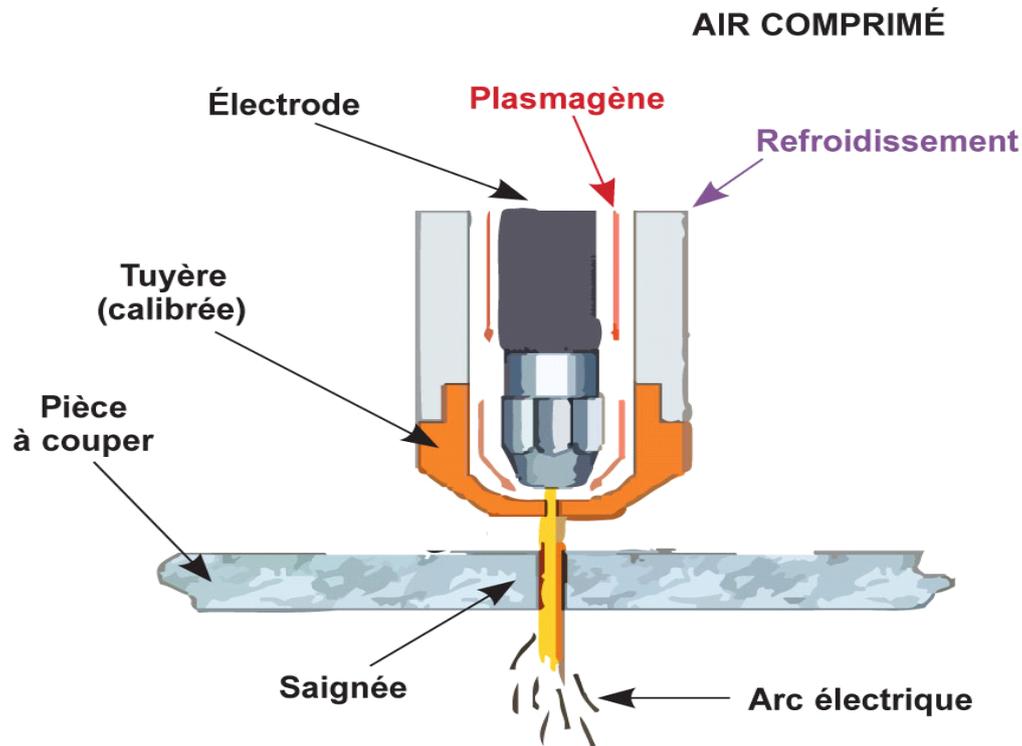


Figure I-7 : Principe du coupage plasma.[8].

### 1-5-4 Soudage par résistance :

#### 1-5-4-1 Principe :

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est provoquée par effet Joule : Courant de forte intensité ( $I > 2000 \text{ A}$ ) sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression «Forge» la soudure. [5].

De nombreux procédés de soudure par résistance existent, en particulier on trouve: le soudage par points, très utilisé en grande et petite série, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder comme le montre-la (Figure I.8).

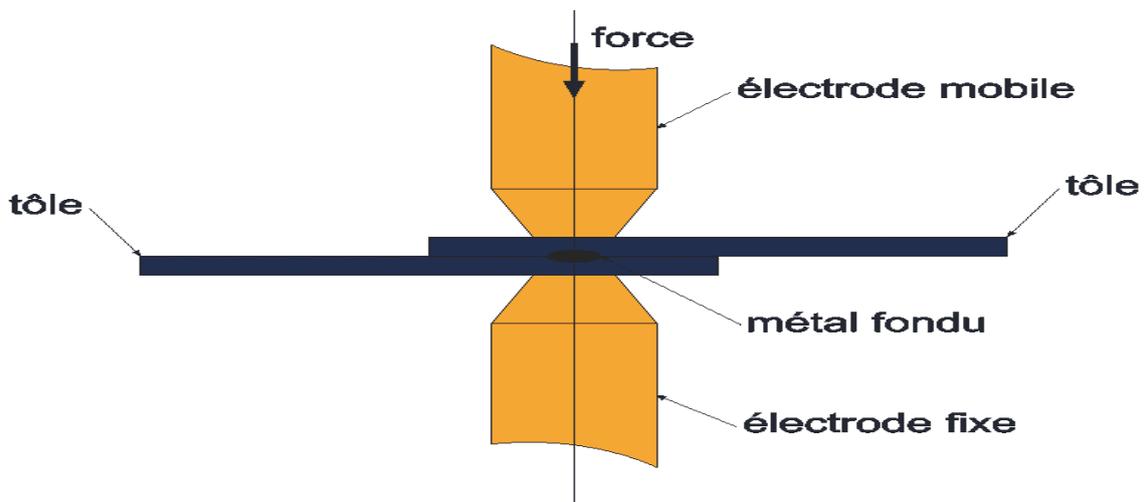


Figure I-8 : Principe du soudage par point.[12].

Il existe de nombreuses variantes de cette technique de soudage tel que le soudage par molette où les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide. (Voir figure I.9).

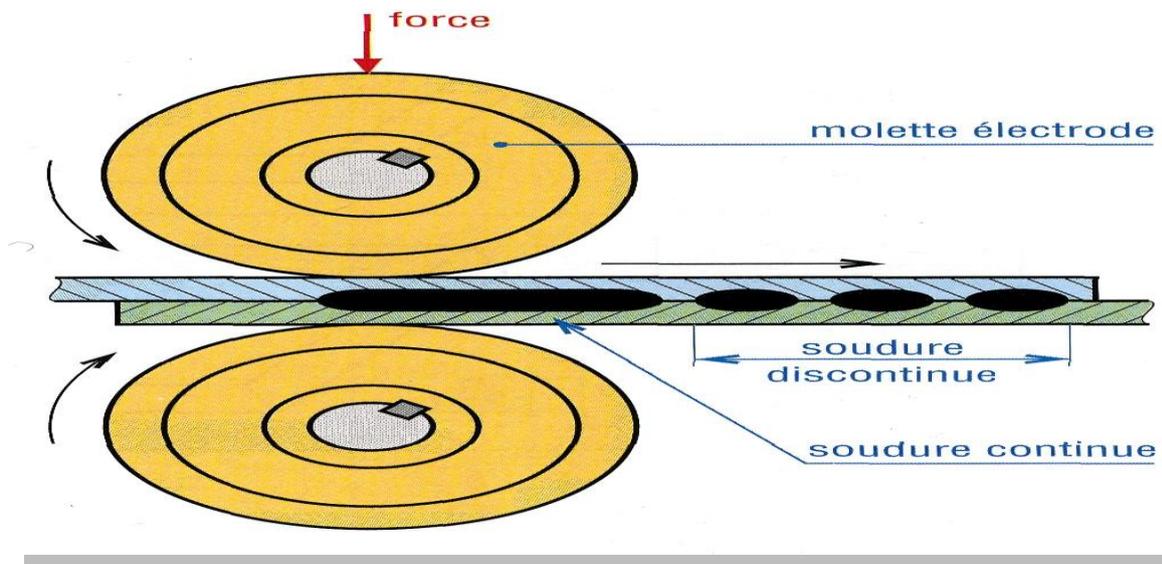


Figure I-9 : Principe du soudage par molette.[12].

**b- Domaines d'application :** Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines :

- Industrie automobile,
- Aéronautique,

- Aéronautique,
- Nucléaire,
- Industrie électrique et électronique,
- Appareils ménagers,
- Mobilier métallique,
- Armatures en fils,
- Soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, ...

Avec ce procédé, on peut souder de différents métaux comme :

- Acier,
- Inox,
- Aluminium...

## 1-5-5 Soudage par faisceau d'électrons :

**a- Avantages :** Le soudage par faisceau d'électrons (Soudage FE) apparaît en 1958 (Figure I.10). Il relève, avec le soudage laser, de la catégorie du soudage par faisceau à haute densité d'énergie. Grâce à l'utilisation de très hautes températures, il permet une pénétration étroite et profonde. [2].

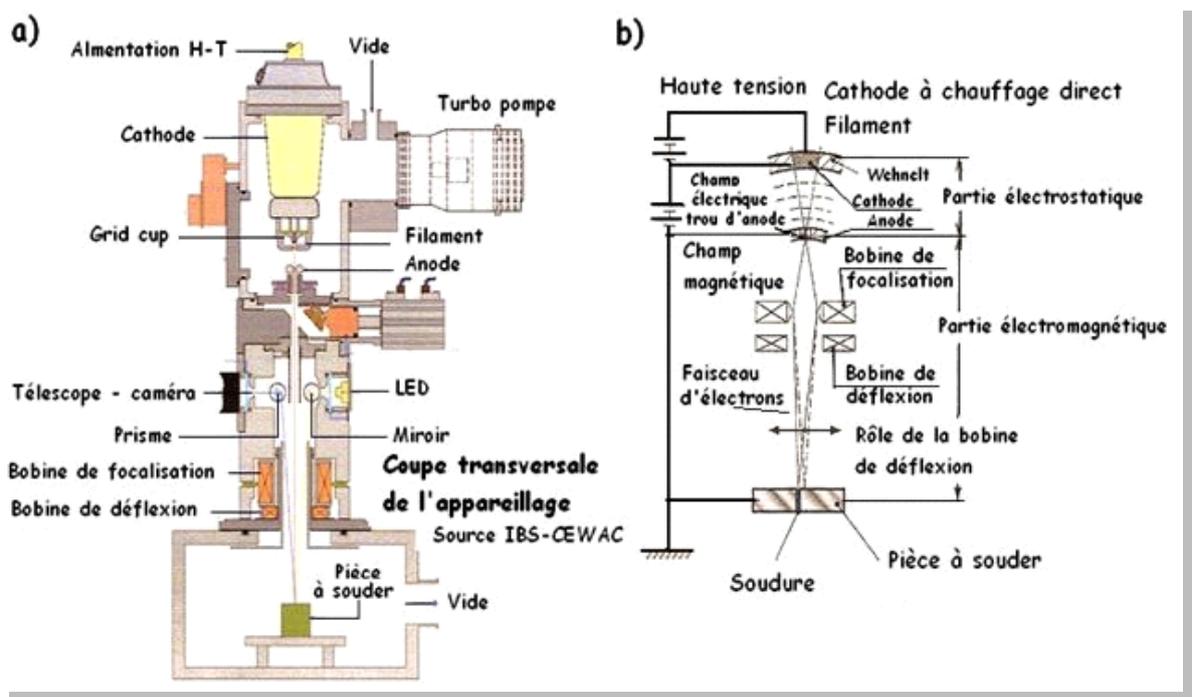


Figure I-10 : Schéma de principe du soudage par faisceau d'électrons.

**b- Inconvénients :** Il présente néanmoins un inconvénient majeur : il faut en effet pouvoir disposer d'une chambre à vide pouvant contenir à la fois le canon à électrons et la pièce à souder. [2]. Haute tension Trou d'anode Bobine de focalisation Bobine de déflexion Cible Anode Cathode Concentration et déflexion.

**c- Utilisations :** L'aéronautique et le nucléaire sont les premiers à le plébisciter.

## 1-5-6 Soudage laser :

Le soudage (Et le coupage) laseront des caractéristiques idéales à plus d'un titre (Figure I.11). Le faisceau laser permet une conduite plus concentrée de la chaleur, des déformations très faibles et de très grandes vitesses de soudage. Malheureusement, un laser puissant est encombrant et coûteux, et il faut trouver le moyen d'amener le faisceau lumineux jusqu'au point de soudure. Pour y parvenir, un système de miroirs réfléchit le faisceau dans les lasers CO<sub>2</sub>, et le rayon peut être transmis par fibre optique dans les lasers YAG, ce qui fait de ces derniers l'instrument idéal pour les robots soudeurs. [2].

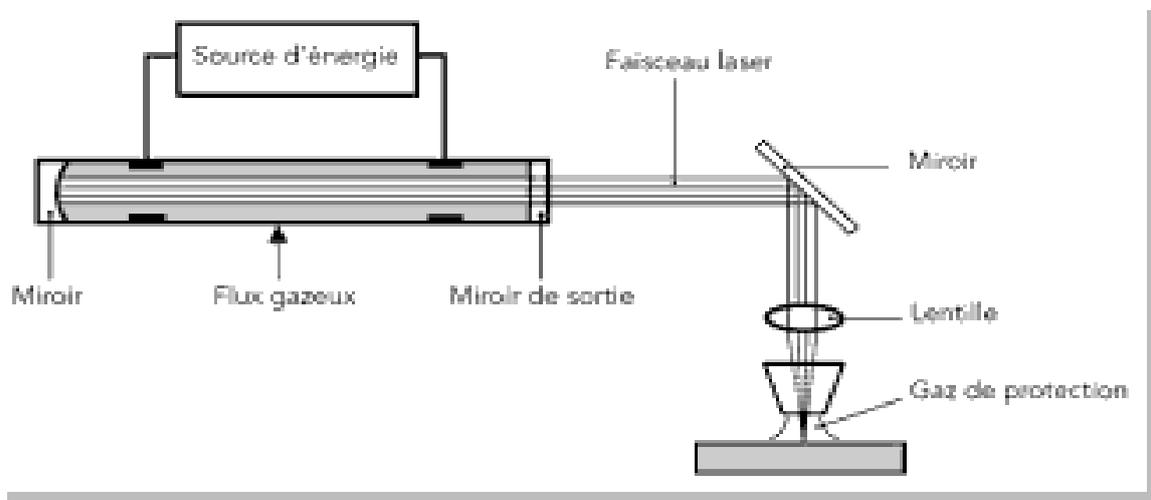


Figure I-11 : Schéma de principe du soudage laser.

## 1-5-7 Soudage électro gaz :

- **Principe :**
- Le soudage électro-gaz est un développement du soudage sous laitier électro-conducteur auquel il ressemble quant à sa conception et son utilisation. Au lieu de fondre dans un laitier, l'électrode fond dans un arc entouré d'un gaz de protection, comme en soudage MIG / MAG. Cette méthode est utilisée pour des tôles de 12 à 100

mm ; un balayage est utilisé pour des épaisseurs supérieures. Le joint est normalement préparé en « I », avec un espace. On utilise aussi des préparations en « V ». En réalisation de joints verticaux, sur de gros réservoirs par exemple, des économies importantes sont faisables,[9]. comparativement au soudage MIG / MAG (Figure I-12).

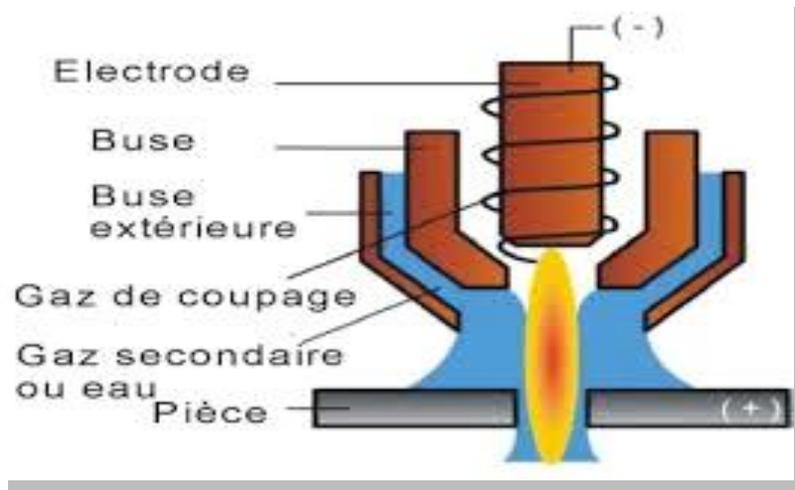


Figure I-12 : Schéma signifie le principe de soudage électro-gaz.[9].

## 1-5-8-Soudage par friction :

On doit parler avec plus de détails sur ce procédé dans le chapitre.2, et on se limite à donner son principe et des exemples d'application.

**a- Principe :** Le principe est comme suit : Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation (Figure I.13-a). Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial ( $F_a$ ) déterminé (Figure I.13-b). Par frottement les pièces s'échauffent de part et d'autre du plan de joint ( $V = 100$  m/min).

Un bourrelet commence à se former (Figure I-13-c). Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté (Figure I-13-d). C'est la phase de forgeage de la soudure qui se traduit par la formation d'un bourrelet très caractéristique. On élimine ensuite ce

bouurrelet par usinage.[7].

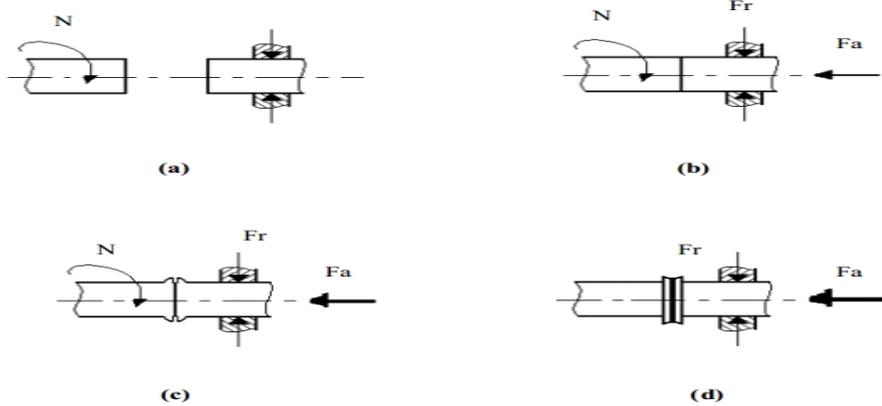


Figure I-13 : Principe du soudage par frottement

On admettant que :

Fa : Force axiale de poussée ;

Fr : Force radiale de maintien.

### 1-5-9 Soudage par friction-malaxage :

**a-Principe :** Lors du soudage par friction-malaxage, un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder (Figure I.14). La matière est ainsi chauffée par friction à des températures où elle est facilement malléable sans entrer en fusion.

Lorsque l'outil avance entre les tôles, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé.[2].

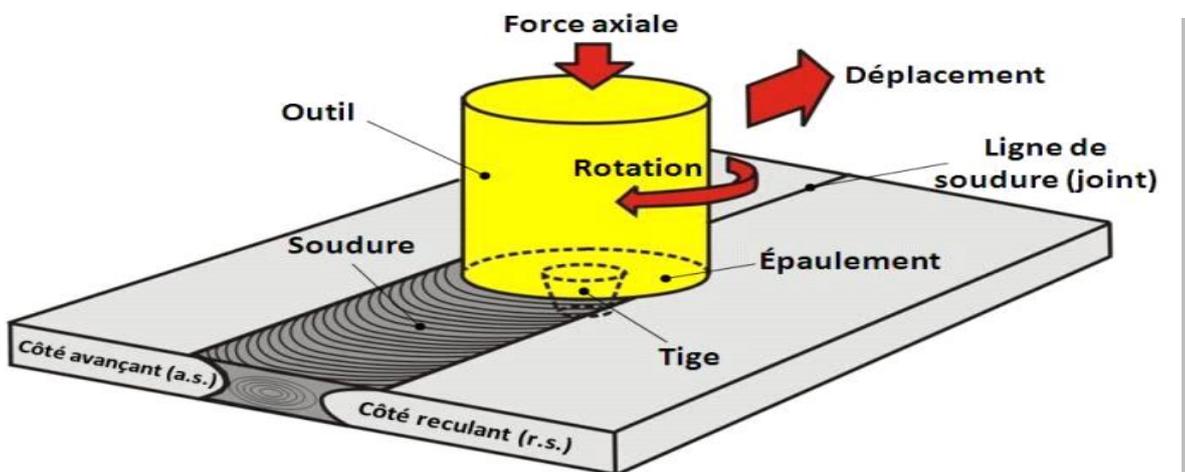


Figure I-14 : Soudage par friction-malaxage.

**b- Domaines d'application :** Ce procédé permet de souder des alliages d'aluminium non soudables avec les procédés TIG et MIG, ainsi que les alliages sensibles à la fissuration à chaud (Alliages Al Cu ou Al Zn Mg Cu).

**b- Inconvénients :** Il présente néanmoins un inconvénient majeur : il faut en effet pouvoir disposer d'une chambre à vide pouvant contenir à la fois le canon à électrons et la pièce à souder. [2]. Haute tension Trou d'anode Bobine de focalisation Bobine de déflexion Cible Anode Cathode Concentration et déflexion.

**c- Utilisations :** L'aéronautique et le nucléaire sont les premiers à le plébisciter.

### 1-6 Conclusion partielle

Le choix du type de soudure dépend, dans chaque cas particulier, du procédé, de la nature et de l'épaisseur du matériau. L'objectif est d'obtenir la meilleure résistance mécanique et la meilleure qualité possibles de la soudure, en limitant les coûts. Pour limiter les coûts, il faut limiter :

- 1) la quantité de métal d'apport (le coût est proportionnel au volume de la soudure).
- 2) l'apport de chaleur (plus il est important et plus il risque d'y avoir des problèmes de résistance aux chocs et de déformation).
- 3) le travail de préparation (on choisira de préférence des types d'assemblages dans lesquels les surfaces font partie de la pièce à souder, et donc généralement une soudure d'angle).

## *Chapitre 2 :*

# *Etude de soudage par friction.*

## **2.1 Introduction :**

Connu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en Union Soviétique vers 1956 puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard.

Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global 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 [12].

Dans une application donnée, il peut entrer en compétition favorable avec les autres procédés utilisables, à savoir et essentiellement : le soudage en bout par résistance ou par étincelage, le soudage par bossage annulaire, le soudage par faisceau d'électrons et le brasage. Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et novateur qui trouve de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages du soudage par friction sont des assemblages de haute qualité, la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnels et la possibilité d'une automatisation complète du processus de telle sorte qu'une qualité constante est garantie. De plus, le procédé de soudage par friction offre, dans le cadre de l'environnement, d'importants avantages : pas de fumées de soudage, pas de rayonnement UV ou électromagnétiques. Autre avantage: pas de métal d'apport ou de gaz de protection.[13].

De plus, l'utilisation du procédé de soudage par friction peut mener à une économie en coût significative (Matériaux et salaires) en remplaçant, par exemple des pièces forgées ou coulées onéreuses par des produits standards soudés par friction.

## **2.2 Définition :**

Le soudage par friction est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Le mouvement relatif entraîne un échauffement de l'interface jusqu'à plastification locale du matériau, puis soudage par diffusion atomique. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique.

La qualité de la liaison ainsi obtenue est supérieure à celle des matériaux utilisés. La (FigureII-1) présenté une machine de soudage par friction dans les ateliers de confection mécanique.[12].

On note que la qualité de la soudure dépend de plusieurs paramètres : la vitesse de rotation, le temps de friction, et la pression exercée. L'avantage d'un tel procédé est qu'il n'y a pas de métal d'apport et qu'il permet de souder des matériaux hétérogènes, de plus, sa mise en œuvre est assez facile.[2].

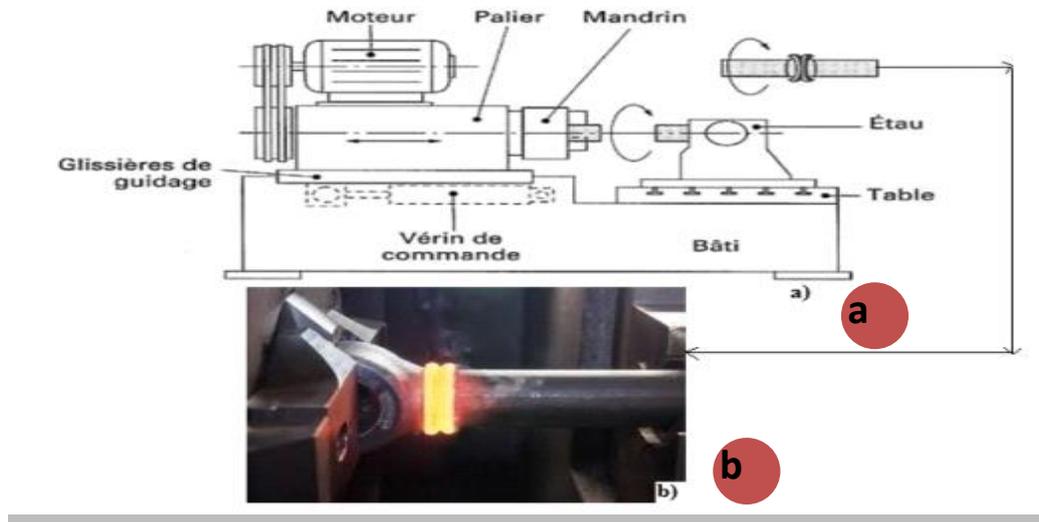


Figure II-1 : Soudage par friction ; (a) Schéma d'une machine de soudage par friction, (b) Exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydraulique [2].

Tableau II-1 : Caractéristiques techniques de la machine à souder.

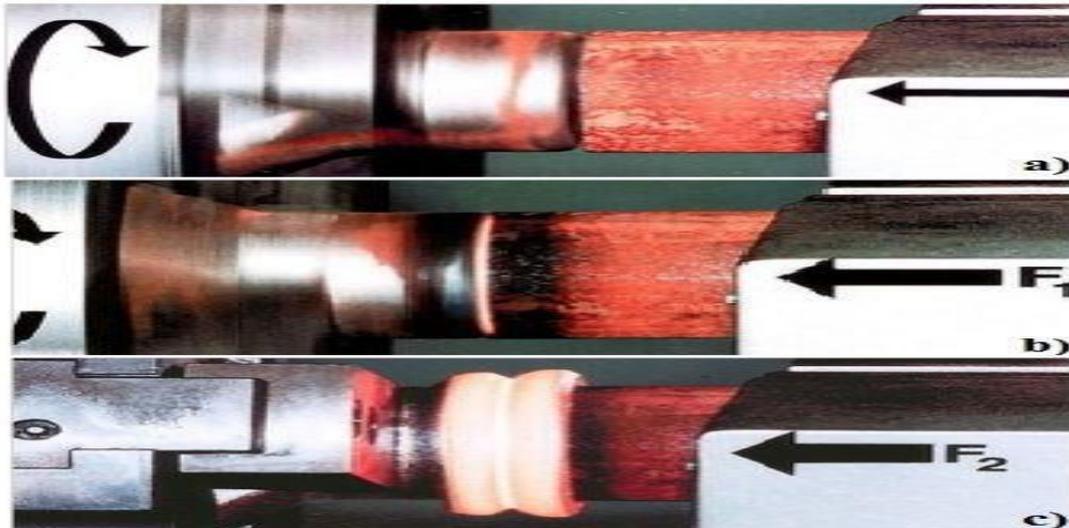
Type d'opération	Automatique
Équipement	Moteur de mise en rotation, frein, système de mise en pression axiale, boîtier de contrôle, mors de prise pièces.
Coût de l'équipement	Variable 5 000 euros.
Vitesse de rotation	50 à 80 000 t/min.
Pression axiale	15 à 400 MN/m <sup>2</sup> .
Gamme de diamètre	1 à 150 mm.
Durée de cycle	5 à 500 s.
Mise en œuvre	Machine standard à raccorder, outillage spécifique.
Portabilité	Généralement fixe en atelier.

### 2.2.1 Principe :

La rotation est le moyen presque exclusivement utilisé pour créer la friction (Figure II-2). La pièce qui tourne est serrée dans un mandrin rotatif entraîné par un Moteur ou un volant d'inertie ; aussi doit-elle présenter au moins dans la zone de soudage une symétrie de révolution.

Dans ce processus, les faces en contact s'échauffent et deviennent la source de chaleur qui, par diffusion, élève la température des extrémités des pièces. Celles-ci deviennent plastiques et un fluage se produit vers la périphérie en formant un bourrelet caractéristique, tandis que la chaleur continue de se diffuser. Lorsque la température de soudage est atteinte, la rotation est arrêtée et un effort de forgeage est appliqué pour former la soudure.

Dans la pratique, le soudage par friction s'applique de façon naturelle à des assemblages, selon leur axe commun, de deux pièces cylindriques, pleines ou creuses et de même section droite au niveau du joint. Les applications se rencontrent donc surtout dans la construction de pièces mécaniques.



**Figure II.2 : Principe de soudage par friction.**

- a) Deux pièces sont clamées et une des pièces est mise en rotation,
- b) Pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force de friction  $F_1$  : la température augmente dans la surface de contact,
- c) Partie en rotation est freinée et la force de forgeage  $F_2$  est exercée [13].

### 2.2.2 Différentes phases opératoires de soudage par friction :

La Figure II-3. Présente de façon schématique les quatre phases opératoires du procédé de soudage par friction. L'opération de soudage peut être décomposée en 03 phases successives :

1. Phase de lancement.
2. Phase de soudage (Friction).
3. Phase de forgeage.

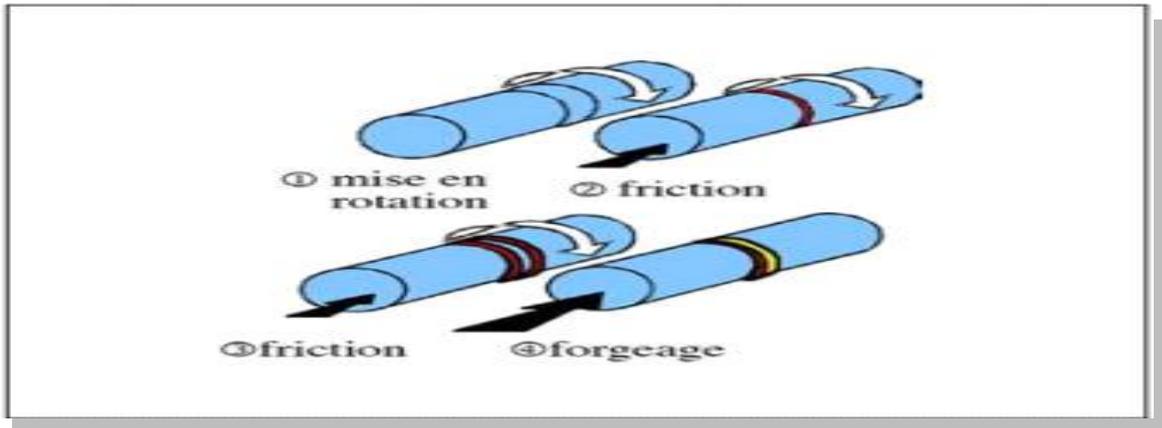


Figure II-3 : Chronologie d'une opération de soudage par friction [14].

#### Phase 1 :

Une des pièces est mise en rotation puis débrayée, elle continue de tourner par inertie.

#### Phase 2-a :

Les deux pièces sont mises en contact sous l'effet d'un effort de pression constant. La rotation diminue librement (Freinage), les pièces s'échauffent localement (Frottement).

#### Phase 2-b :

Sous l'effet de la chaleur et de l'effort, les pièces se déforment (L'ensemble se raccourci). La vitesse de rotation continue de diminuer.

#### Phase 3 :

Lorsque la pièce a entièrement décéléré, les pièces refroidissent pendant que l'effort en maintenu constant.

### 2.2.3 Cycle de soudage :

Les paramètres influant sur la qualité de ce type d'assemblage sont :

- \*Temps de soudage.
- \*Pression exercée entre les pièces.
- \*Vitesse de rotation relative
- \*Consommation de matière.

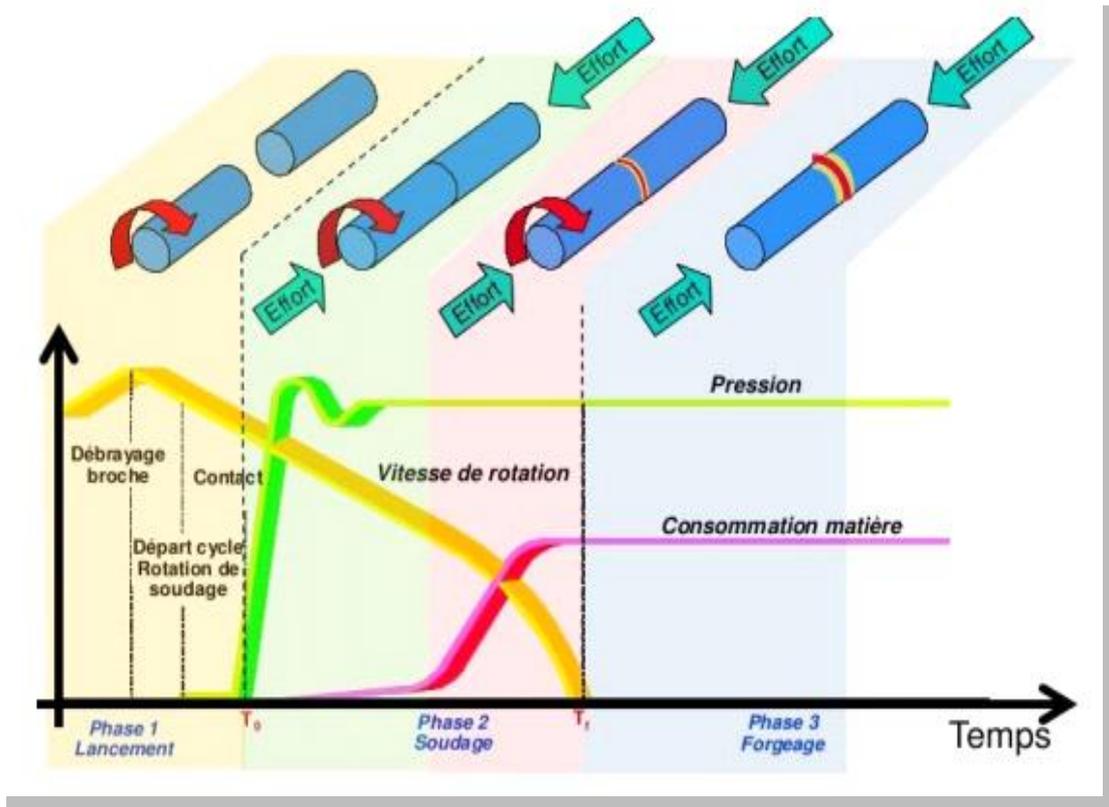


Figure II-4 : Cycle de soudage par friction [15].

### 2.3 Caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques sont maintenues voire améliorées :

**Résistance à l'extension :** Résistance à l'extension dans la zone d'assemblage est au moins égale à celle des matériaux soudés.

**Résistance à la torsion :** Zone d'assemblage a les mêmes caractéristiques de résistance à la torsion que les pièces soudées.

**Résistance à la flexion :** Résistance à la flexion est inférieure à celle des matériaux assemblés dans la zone de la soudure. Cette perte est de l'ordre de 15 %.

**Dureté :** Dureté, dans la zone soudée, est supérieure à la dureté des matériaux assemblés. Le gain de dureté dépend du matériau, de son état métallurgique et du cycle de soudage.

Le tableau II-2 : présente les principales caractéristiques du soudage par friction.

Tableau II-2 : Caractéristiques techniques du soudage par friction [16].

Vitesse de rotation.	50 à 80 000 t/min.
Pression axiale.	15 à 400 MN/m <sup>2</sup> .
Gamme de diamètre.	1 à 150 mm.
Durée de cycle.	5 à 500 s.
Mise en œuvre.	Machine standard à raccorder, outillage spécifique.
Portabilité.	Généralement fixe en atelier.

❖ Soudabilité :

Le procédé de soudage par friction s’applique à un grand nombre de matériaux semblables et dissemblables ainsi que la montre le tableau II-2. Il présente, de ce fait, par rapport aux soudages par étincelage et à l’arc, un avantage capital.

TableauII-3 : Soudabilité des métaux et alliages les plus couramment utilisés en soudage par friction [11].

Métaux et alliages	Aluminu	Alliages	Bronze	Cuivre	Magnésiu	Monel	Nickel	Nimonic	Aciers	Aciers	Aciers	Aciers	Titane
Aluminium	■	■	□	■	▲	□	■	□	■	□	□	■	■
Alliages d'Al	■	■	□	□	▲	□	□	□	•	□	□	▲	□
Bronze	□	□	▲	□	□	□	□	□	▲	▲	□	□	□
Cuivre	■	□	□	▲	□	□	□	□	■	□	□	■	□
Magnésium	▲	▲	□	□	▲	□	□	□	□	□	□	□	▲
Monel	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	■	□
Nickel	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■
Nîmois	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	□	■	□
Aciers	■	•	▲	■	□	□	□	■	■	■	■	■	▲
Aciers coulés	□	□	▲	□	□	■	□	■	■	■	■	■	□
Aciers spéciaux	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	□
Aciers inoxydables	■	▲	□	■	□	■	□	■	■	■	■	■	▲
Titane	■	□	□	□	▲	□	■	□	▲	□	□	▲	■

■ Bonne soudabilité
▲ Soudabilité
• Soudure délicate
□ Impossible ou non essavé

### 2.4 Machines a soudé :

En général, une machine de soudage par friction se caractérise en première approche par l’effort maximal qu’elle peut produire au forgeage. Ce paramètre fournit, en effet, une indication de la taille de machine ainsi que de sa capacité. On admet que, en soudage d’aciers peu alliés, l’effort unitaire moyen de forgeage est de 8 à 12 daN/mm<sup>2</sup> (Tableau II.4).

Cela permet de déduire :

- La section maximale pleine ou tubulaire soudable par la machine.
- La puissance et la vitesse de broche pour une section pleine correspondante.

Le tableau II-4 fournit les caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée. Il existe actuellement sur le marché des équipements allant de quelques centaines de newtons à 200 000 daN et plus.

**Tableau II-4 : Caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée [11].**

<b>Effort maximal en forgeage (daN)</b>	3 000	6 000	12 000	25 000	50 000	100 000	200 000
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Capacité maximale sur acier mi-dur (*) (mm<sup>2</sup>)</b>	200	400	800	1 600	3 200	6 400	13 000
<b>Diamètre de barre</b>	16	22.5	32	46	64	90	129
<b>Vitesse de rotation nominale de broche (**) (tr/min)</b>	3 000 et 1 500	3 000 et 1 500	2 200 et 1 100	1 460 et 730	1 200 et 900	1 000 et 500	350 et 700
<b>Puissance du moteur de broche (kW)</b>	11	14.7	22	29.5	51.5	73.6	89

(\*) La capacité minimale (effort minimal et vitesse maximale) peut être 1/10 ou 1/20 de la capacité maximale.

(\*\*) Sur les machines de production, la vitesse est ajustable par modification du rapport d'entraînement.

On considère :

- Machines standards d'emploi général.
- Machines spécifiques adaptées à un travail particulier.

Dans chacun de ces domaines, les machines peuvent se distinguer par leur cinématique de principe et par la disposition relative de leurs éléments.

Une machine à friction combine essentiellement une broche tournante et une commande d'avance produisant un effort, l'ensemble étant supporté par le bâti. Dans la figure II-1 on représente un exemple d'une machine de soudage par friction.

## **2.5 Avantages du soudage par friction :**

Les avantages du soudage par friction sont :

Assemblages de haute qualité, avec une bonne structure métallurgique, car le matériau n'est pas porté à fusion.

Pas de préparation spéciale des pièces.

Procédé de soudage beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.

Peu de déformations après soudage en raison du bref temps de soudage et de la faible température maximale.

Possibilité de souder des pièces de sections très différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.

**Economique :** le soudage par friction permet de réaliser des économies sur le coût des pièces soudées (Economie en temps, en matériau et en salaire).

Les matériaux dissemblables ne pouvant être soudés avec d'autres procédés, peuvent être soudés avec le procédé par friction, comme Aluminium ou le cuivre sur Acier.

Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.

Pas de nécessité de métaux d'apport.

**Ecologique :** pas de gaz de protection, fumées ou rayonnements.

Pas de nécessité de soudeurs agréés.

## **2.6 Limites du soudage par friction :**

L'alignement des pièces à souder est critique pour la réalisation d'une friction et d'un chauffage uniformes.

Les ébarbures doivent être éliminées mécaniquement.

Coût d'investissement de l'appareillage.

Les techniques de contrôle non destructif ne sont pas encore appliquées sur les soudures par friction. Le risque existe donc que ces techniques ne puissent pas détecter tous les défauts de soudage. La surveillance des paramètres du processus est probablement la meilleure méthode pour le contrôle de qualité.

Le soudage par friction ne peut pas être appliqué sur des matériaux ayant un très faible coefficient de friction comme la fonte grise, le bronze et le laiton à forte teneur en plomb (Les particules de graphite agissent comme des lubrifiants et contrecarrent l'échauffement).

Lors du soudage de très grandes sections, la capacité de la machine peut constituer une limite.

## 2.7 Domaines d'application :

- Raison de ses larges possibilités d'applications, il n'est pas étonnant que le soudage par friction soit souvent utilisé dans des secteurs divergents.
- Domaines d'application sont entre autres l'industrie Aéronautique et la Pétrochimie (Soudage de brides ou de tubes de forage).
- Industrie automobile (Soupapes, Axes, ...).
- Industrie électrique (Raccords, Electrodes,), Forage (Raboutage de tubes, ...).
- Soudage par friction est également Soudabilité (Facilement soudable : Aciers, Inox, Monel, Aluminium, Titane ; Difficilement Soudable : Bronze, Cuivre, ; Joints hétérogènes : Aluminium-Cuivre, ...).

Le grand avantage de cette technique de soudage réside dans le fait que certaines combinaisons de matériaux peuvent être soudées, alors qu'elles ne le sont pas avec des techniques de soudage traditionnelles.

### ➤ **Domaine de l'automobile :**

Le soudage par friction est utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des soupapes, des tiges de piston, des pompes à eau....



**Figure II-5 : Pièce d'un turbo [1].      Figure II-6 : Partie d'une boîte de vitesse [1].**



Figure II-7 :Partie d'un amortisseur :tube le tube à double paroi est soudé en une fois [1].

Figure II-8 :Partie d'un cric hydraulique : Soudé à une pièce compressée [1].

➤ **Domaine l'industrie aéronautique et du spatial :**

Le procédé de soudage par friction peut être utilisé pour de nombreuses applications. Il est ainsi utilisé dans l'aviation et la navigation spatiale pour le soudage de boulons à crochet (Figure II-10), pour la fabrication de tiges de piston légères (Figure II-9) ou pour des éléments de boîtes de vitesse (Figure II-11).



Figure II-9 :Soudage de tiges de piston [1].

Figure II-10 :Production de boulons crochet [1].



Figure II-11 : Soudage des roues dentées d'une boîte de vitesse [1].

➤ **Domaine l'industrie pétrolière :**

Le soudage par friction est également utilisé dans la pétrochimie, par exemple pour le

➤ Soudage de brides à des valves hydrauliques (Figure II-12) ou pour le soudage de tiges de forage. Les soudures par friction sont suffisamment fortes pour résister aux couples élevés durant le forage.



Figure II-12 : Fixation d'une bride à une valve hydraulique [1].

➤ **Domaine de l'agriculture :**

Le soudage par friction est également très utilisé lors de la production d'éléments pour trucks, véhicules agricoles (Figures II-13 et II-14), camions et engins agricoles par exemple les tiges à des yeux de tige (Figure II-15). Une économie notable en coût peut être réalisée par le remplacement de pièces complètement forgées par de petites pièces forgées soudées à des barres ou des tubes [13].

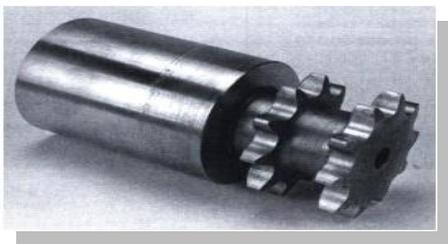


Figure II-13 : Remplacement de pièces forgées Figure II-14 : Piston d'un moteur diesel.

ou coulées par des profilés standards soudés par friction [1].



Figure II-15 : Arbres de transmission soudés par friction.[13].

## **2.8 Etude expérimentale est élaborée en vue de déterminer les caractéristiques structurales d'un joint soudé par friction (acier A 60 et aluminium 2017 A) :**

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des joints soudés RFW pour assemblages homogènes et hétérogènes. Nous avons étudié les aciers A60 et l'aluminium de la série 2017A alliages. Dans les étapes de caractérisation, nous avons utilisé certains appareils et instruments spécifiques. Nous avons utilisé des essais de traction et des mesures de micro-dureté pour obtenir des propriétés mécaniques, ainsi que des observations microscopiques pour des analyses métallographiques. Des comparaisons de ces caractéristiques pour certaines soudures sont effectuées à la fin.

### **2.8.1 Procédure expérimentale**

Une perceuse à colonne (BX-833V) a été utilisée pour le soudage par friction rotative, comme le montre la figure II-16, de nos différents échantillons. Deux vitesses de rotation sont employées 1000 et 1600 tr / min. Le thermomètre infrarouge IR-730 est utilisé qui nous permet de mesurer la température qui règne sur la pièce en rotation pendant le processus. Le thermomètre infrarouge est spécialement conçu pour les applications industrielles de maintenance, automobile, contrôle qualité et prévention des incendies, etc. de -32°C à 1250°C.

Le dynamomètre AFG (Advanced Force Gauge), voir figure II-16, est le plus complet et le plus polyvalent instrument de mesure de force actuellement disponible sur le marché, il peut être utilisé indépendamment ou fixé sur un banc d'essai manuel ou motorisé pour une plus grande flexibilité, le dynamomètre AFG est capable de reconnaître des données de couple avec ce système. L'AFG devient alors un écran universel quel que soit l'application.

Le tachymètre utilisé combine la mesure optique et mécanique de la vitesse de rotation. Une connexion à un adaptateur, un cône ou une roue permet de passer à la mesure mécanique. Cela permet de mesurer la vitesse ainsi que la distance. Les bandes réfléchissantes (en option) permettent une mesure à effectuer en les attachant à l'objet à mesurer. Il ne reste plus qu'à placer la tache lumineuse sur le ruban pour effectuer la mesure.



Figure II-16 : Schéma de l'installation expérimentale de soudage et ces instruments.

Tableau II-5 : Caractéristiques générales de la machine.

Modèle	BX-833V
Capacité de perçage dans l'acier mm	32
Tension des moteurs 400 volts	400
Puissance moteur kW	1.5
Vitesse de rotation tr. / min.	variable 195 – 2000
Perçage mm	140
Cône de broche cm	3
Diamètre de broche mm	62
Diamètre de la colonne mm	102
Dimensions de la table mm	310 x 470
Largeur de la rainure en T mm	14
Dimensions hors tout (max) h / p / l mm	1790 x 940 x 510
Poids kg	280

Nous avons étudié le procédé de soudage RFW pour des tiges de 10 mm de diamètre de deux matériaux, les alliages d'aluminium 2017A et d'acier A 60; leurs compositions chimiques sont présentées dans les tableaux II-6 et II-8 respectivement.

Tableau II-6 Compositions chimiques de 2017A et les pourcentages des éléments aditifs [17].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+ti
0.20-0.80	≤ 0.70	3.5-4.5	0.4-1.0	0.4-1.0	≤ 1.0	≤ 0.25	< 0.25
Chaque autre			Total autre			Al	
≤ 0.05			≤ 0.25			Reste	

Les propriétés mécaniques conventionnelles des alliages d'aluminium 2017A (limite d'élasticité à 0,2% Rp0,2, La résistance à la rupture Rm et l'allongement à la rupture A) actuellement utilisés sont indiqués dans le tableau II-6.

Tableau II-7 Propriétés mécaniques de l'alliage 2017A.

Ø (mm)	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A (% mini)
Ø ≤ 55	≥400	≥250	10

L'acier utilisé dans notre étude est un acier non allié d'usage courant (désignation européenne: Fe590-2 + E335 ou 1.0060, désignation allemande: St 60-2, désignation française: A60-2 ou A60) du produit chimique composition représentée dans le tableau II-7, les dimensions des pièces sont de 150 mm de longueur et Ø10 mm en diamètre.

Tableau II-8 Composition chimique de l'acier A60 en pourcentage en poids [18]

Eléments	P	S	N	Fe
pourcentage massique	0.055	0.055	0.014	Reste

L'acier est destiné à un usage général en mécanique générale. Il n'est pas traité, il offre une bonne résistance mécanique. Usage général de l'acier de construction non allié. L'analyse chimique n'est pas définie par la norme et ne garantit aucun traitement thermique. Utilisé dans les pièces soumises à des pressions de surface élevées, engrenage à vis sans fin, pignons, clés, arbres, bagues ... etc.

**Tableau II-9 Propriétés mécaniques de l'acier A60.**

Nuance	Re(N/mm <sup>2</sup> )	Rm(N/mm <sup>2</sup> )	A%	Dureté
A60	335	590-710	14	HV=171-204

La découpe a été réalisée dans l'atelier « préparation mécanique » du C.R.T.I. centre de recherche (à Alger) à l'aide d'une machine de découpe (disque en acier) avec la lubrification continue à froid pour éviter tout chauffage qui pourrait modifier les propriétés et les caractéristiques du matériau. Échantillons de traction soudés et aucune soudure n'est immédiatement passée par l'usinage de traction (INSTRON); assisté par le logiciel bluehill3. Selon la norme AFNOR qui recommande les éprouvettes rondes dont des formes sont illustrées sur la figure II-17a et la figure II-17b. Les tests ont été effectués et à température ambiante Température.

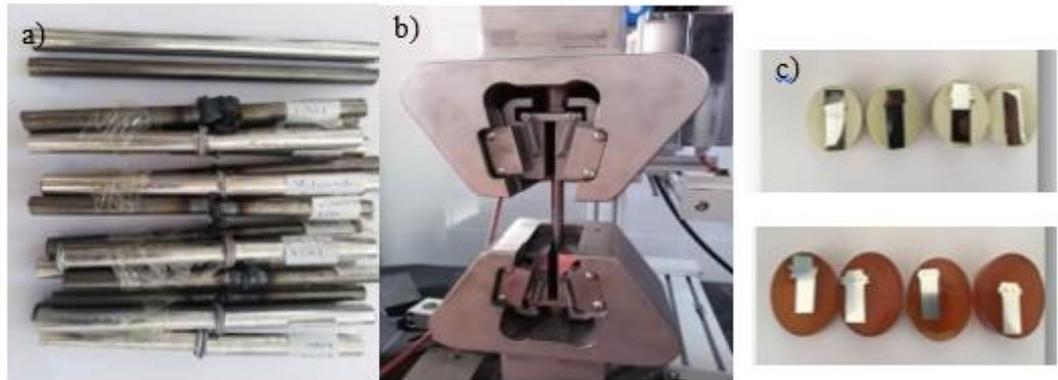
**Revêtement:**

Le but du revêtement est de pouvoir traiter de petits échantillons de forme irrégulière ainsi que pour protéger les matériaux fragiles avec de fines couches de revêtement pour assurer des arêtes vives. Il existe deux méthodes de revêtement : revêtement à chaud et celui pour l'acier A60 et revêtement à froid pour l'aluminium. Pour le revêtement à chaud, le moyen d'utiliser est un emballage, plus la résine, un durcisseur et appliquer une température de 180 ° C pendant une période de 20 min pour l'acier. Pour le revêtement à froid, il a été réalisé à l'aide d'un durcisseur plus une résine pour éviter toute réaction avec le substrat.

**Polissage:**

L'état de surface obtenu après les coupes dans la tronçonneuse, bien que lisse au toucher, est clairement insuffisant pour une observation microscopique. L'image obtenue sur ces échantillons bruts l'est aussi floue pour être exploitable, d'où la nécessité d'un ponçage. Ce dernier est réalisé à l'aide d'une variable polisseuse manuelle à vitesse de 0 à 500 tr / min utilisant des papiers abrasifs de granulométrie variée du N ° 80 au N ° 4000 pour une bonne finition (état miroir) avec papier feutre plus alumine en suspension, (Figure II-17c).  
Attaque chimique : La gravure chimique de l'acier se fait par une solution contenant un mélange de 100 ml d'Éthanol C<sub>2</sub> H<sub>5</sub> OH plus 1% HNO<sub>3</sub>. La réaction se fait rapidement, cependant une précaution particulière doit être pris à l'apparition de petites bulles à la surface: Il est nécessaire d'homogénéiser la solution sur la surface pour éviter une brûlure aux endroits

de leur apparition et pour l'aluminium on utilise une attaque par une solution contenant le mélange de Keller: 95 mL H<sub>2</sub> O, 2,5 mL HNO<sub>3</sub>, 1,5 mL HCl et 1,0 mL HF. L'objectif est de voir l'effet des paramètres de soudage sur la microstructure grâce à une étude métallographique. Ainsi, nous avons utilisé un microscope optique de la marque Nikon Eclips LV 100 ND, fourni avec le logiciel (Nikon) pour son asservissement sur PC. L'appareil ayant un grossissement puissance de x2000, nous avons pu descendre à 5.



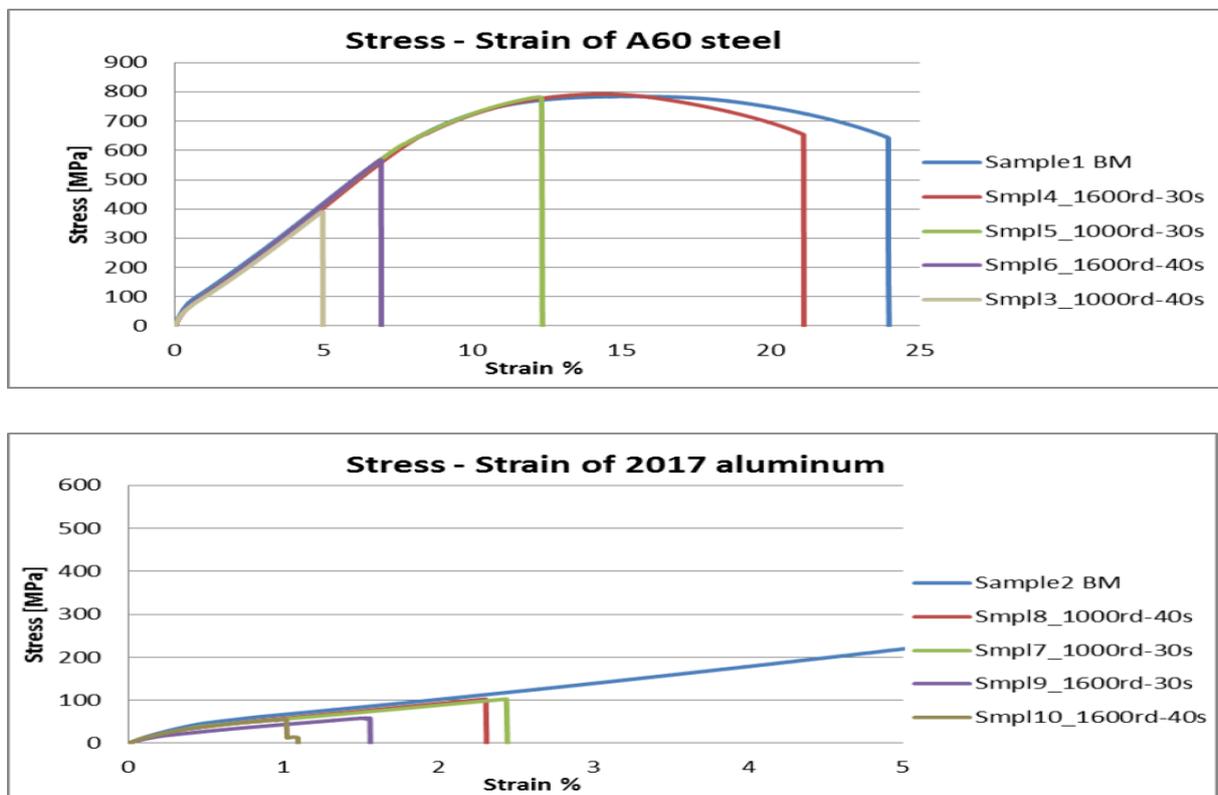
**Figure II-17 : a, b, quelques étapes de préparations et caractérisations.**

**Microdureté Vickers :** après des tests de traction pour déterminer les propriétés mécaniques de la soudure couture, nous avons opté également pour les tests de micro-dureté Vickers (WILSON 3300). Nous avons travaillé sur 2 lignes avec points parallèles (des mesures ont été effectuées au C.R.T.I-Alger). Le plus grand nombre de points de mesure est fait sur la zone de soudure de chaque échantillon, une étape régulière séparant les points de chaque ligne du centre en allant respectivement vers les deux HAZ, de manière à avoir une symétrie par rapport au centre du soudage. Le HAZ est très petit par rapport au WZ, car il ne dépasse pas 3 mm. Contraint par ce facteur, nous ne pouvons pas dépasser les 03 points de mesure pour chacun d'eux. Afin de contourner ce problème et avoir des points de mesure relatifs au même endroit pour chaque échantillon, on s'éloigne de la ligne de jonction de 0,3 mm pour chaque échantillon, puis nous reprenons l'étape à 0,5 mm, ce qui nous permet d'être capable de comparer correctement les différents échantillons. Pour le Métal de Base, on s'éloigne du bord du HAZ de 0,5 mm et procéder à la mesure de 03 points en ne prenant pas 01 mm. À la fin de toutes les mesures, on calcule pour chaque point de la courbe une moyenne entre 03 points parallèles. La charge utilisée est de 300g.

## 2.8.2 Résultats et discussions

### 2.8.2.1 Analyse mécanique

Pour nos travaux, nous avons réalisé des essais de traction sur des éprouvettes rotatives soudées par friction pour étudier la résistance des cordons de soudure. Ces essais sont effectués sur plusieurs groupes d'échantillons dont la différence est caractérisée par la différence des paramètres de soudage (vitesse de soudage, temps de soudage, etc.). De plus, chaque groupe est composé de quatre tubes à essai (voir les figures II-18). Les essais de traction montrent que les soudures ont une large plage de contraintes jusqu'à 637,13 MPa (plage élastique) pour Acier A60 ; et jusqu'à 115,78 MPa pour l'aluminium 2017A (Figure II-18a et Figure II-18b).



**Figure II-18 : Courbes d'essai de traction des éprouvettes soudées et comparées au métal de base BM de :a) Acier A60, b) Aluminium 2017A.**

Il est important de noter que la rupture lors des essais de traction pour la majorité des éprouvettes de traction s'est produite à l'extérieur du cordon de soudure, ce qui reflète la qualité de la soudure obtenue, et le domaine plastique commence à partir de 570 MPa. Les essais de traction réalisés sur les éprouvettes Aluminium 2017A, présentent une bonne

résistance mécanique et leurs caractéristiques mécaniques ( $R_e$  et  $R_m$ ) sont proches des caractéristiques données par la norme, donc les certificats de conformité. Dans l'ensemble, il a été constaté que les éprouvettes ont le temps de soudage le plus court ( $t = 30$  s) ont une meilleure traction courbe, quel qu'il soit en métal. Alors que les éprouvettes avec des vitesses de rotation plus élevées (1600 rd / mn) ont la meilleure limite de traction pour l'acier.

### 2.8.2.2 Caractérisations métallographiques et de dureté

Les attaques chimiques utilisées ont permis de mettre en évidence les microstructures des différents couples analysés et liés aux matériaux soudés Alu-Alu, acier-acier et Alu-acier. Cet examen nous a permis de souligner que le soudage ne présente aucun défaut et que l'on peut distinguer les structures lors du soudage zone [19]. Et la différence des couches est lisible voir la structure du grain dans la zone de soudage. Les mesures de microdureté montrent clairement cette différence de couche.



a)

b)

**Figure II-19 : Micrographie optique en acier A60 de : a) Le BM, b) le HAZ.**

La microstructure du métal de base qui a subi une transformation structurelle (zone affectée par la chaleur) (Figure 4b) montre une structure martensitique dominante pour le métal A60 avec apparition de petits grains en bainite, en raison de la forte teneur en carbone de cette dernière. La zone affectée par la chaleur (HAZ) a connu une augmentation de température. Il est limité vers le centre par la zone thermo mécaniquement affectée (ZATM). Le cycle thermique subi par la HAZ affecte la taille des grains ; il y a un léger agrandissement de la granulométrie dans cette zone. Le gradient de température obtenu lors de l'assemblage peut également affecter les caractéristiques de dureté. Il y a une baisse de dureté dans cette zone (Figure II-21). Quelles que soient les conditions de soudage, il y a une diminution de la dureté du HAZ qui vient de la restauration. La légère augmentation de la dureté du noyau provient de

raffinement de la structure cristalline. La micrographie optique de l'acier A60 (figure II-20) montre une microstructure classique ferritique-perlitique avec grains polyédriques de  $\alpha$ -ferrite en blanc et colonie de perlite (carbure de fer  $\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C) en noir, comme indiqué dans (Figure II-20) a Métal de base.

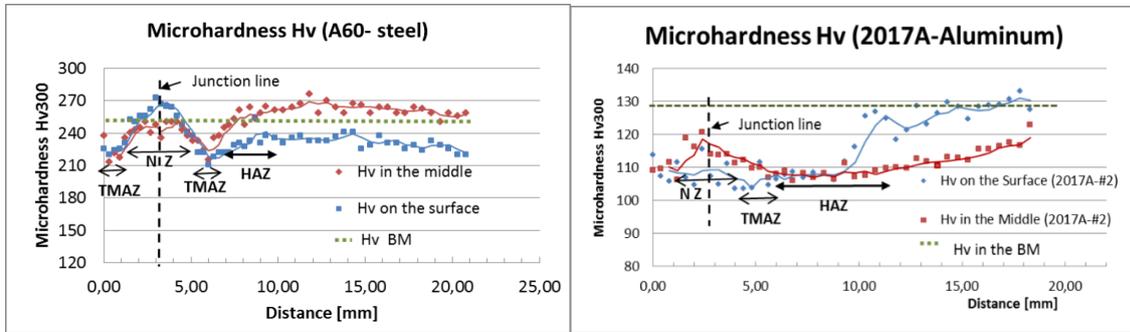


Figure II-20 : Évolution de la microdureté: a) de l'acier A60, b) de l'aluminium 2017A.

La zone thermo mécaniquement affectée (ZATM) est autour du noyau (Weld Zone WZ) et elle est délimitée par la limite de la zone thermiquement affectée. Il subit de grandes déformations qui provoquent un changement d'orientation des grains par rapport à la direction initiale de la déformation. Une différence d'orientation des grains dans cette zone peut être distinguée en fonction du flux de matière. Le noyau subit une grande déformation et un gradient de température très élevé qui le ramène à une situation semi-solide visqueuse. Dans cette zone, le matériau est soumis à un gradient intense de déformation. Les grains du métal de base sont totalement écrasés par le processus et subissent une dynamique recristallisation [20, 21]. Des observations microscopiques dans cette zone révèlent des grains fins et équiaxes (Figure 21).

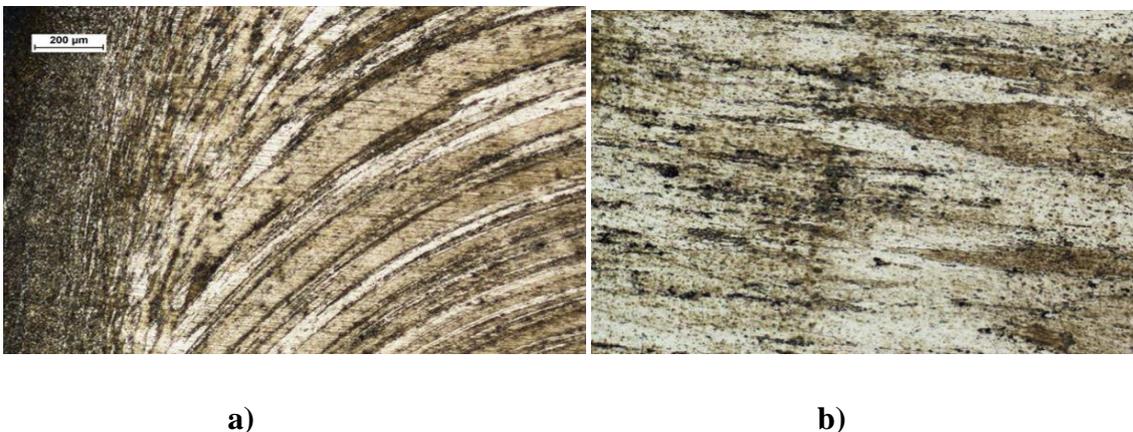


Figure II-21 : Micrographie optique en alliage 2017A de : a) la zone de soudure et la ZATM, b) le BM.

La composition chimique d'un alliage et sa situation métallurgique obtenue par traitement thermique et / ou la déformation à froid lui confère ses propriétés mécaniques. La forme des grains observés est indépendante de la nature de l'alliage, mais dépend principalement de la mise en forme et s'il y a eu ou non recuit. Cet état métallurgique est altéré par l'élévation de la température dans la zone soudée. Dans le cas d'alliage d'aluminium, il en résulte une diminution locale des propriétés du métal de base dans la zone soudée (zone thermiquement affectée, la HAZ), (Figure 6a). Dans ce cas également, la dureté est plus ou moins élevée dans la zone du noyau et dans le matériau de base caractérisé par la présence de précipités responsables du durcissement.

## **2.9 Conclusion**

Les résultats de l'étude paramétrique, bien qu'ils nous aient permis d'identifier l'influence de certains paramètres de fonctionnement comme l'augmentation de la vitesse de soudage dans un domaine de soudabilité défini, mais montrent également difficulté d'identifier l'impact de chaque paramètre sur les caractéristiques mécaniques des cordons. Cette difficulté s'explique par le couplage des phénomènes physiques résultant de ces Paramètres de fonctionnement. Des observations microscopiques de la perle ont identifié les différentes zones de la Joint de soudure par friction. Ils ont conduit à l'identification des frontières entre ces différents espaces par le changement de microstructure et d'orientation des grains. A l'issue des essais de traction uniaxiale, les joints soudés par friction ont montré des propriétés mécaniques acceptables de nos soudures.

# *Chapitre 3 :*

## *Simulation numérique*

## 3.1 Présentation de l'environnement ABAQUS :

Abaqus est une suite de puissants programmes de simulation d'ingénierie basée sur la méthode des éléments finis, vendus par Dassault Systèmes dans le cadre de leur produit SIMULIA des outils de gestion de cycle de vie (PLM). Ses caractéristiques comprennent :

- Abaqus contient une vaste bibliothèque d'éléments qui peuvent modéliser pratiquement toute géométrie ;
- Vous pouvez importer les **géométries** à partir d'un grand nombre de logiciels de CAO différents (compatibilité) ;
- En utilisant Abaqus, vous devriez être en mesure d'utiliser divers modèles de matériaux différents pour simuler le comportement de la plupart des matériaux d'ingénierie typiques, y compris les métaux, le caoutchouc, polymères, composites, béton armé, écrasable et mousses élastiques et des matériaux géotechniques tels que les sols et les roches ;
- Conçu comme un outil de simulation à usage général, Abaqus peut être non seulement utilisé pour étudier les problèmes structurels (charge / déplacement). Il peut simuler des problèmes dans des domaines aussi divers que le transfert de chaleur, la diffusion de masse, la gestion thermique des composants électriques (couplé thermique analyses électriques), l'acoustique, la mécanique des solides (analyses pore fluide-stress couplé), et l'analyse piézo-électrique ;
- Abaqus offre un large éventail de capacités pour la simulation des applications linéaires et non linéaires. Problèmes avec plusieurs composants sont modélisés en associant définition la géométrie de chaque composant avec les modèles de matériaux appropriés et en spécifiant les interactions des composants. Dans une analyse non linéaire ABAQUS choisit automatiquement par incrémentation des charges appropriées et les tolérances de convergence et les ajuste en permanence au cours de l'analyse pour faire en sorte qu'une solution précise est obtenue d'une manière efficace.[22]

Une analyse complète Abaqus se compose généralement de trois étapes distinctes : le prétraitement, la simulation et le post-traitement. Ces trois étapes sont reliées entre eux par des fichiers comme indiqué ci-dessous :

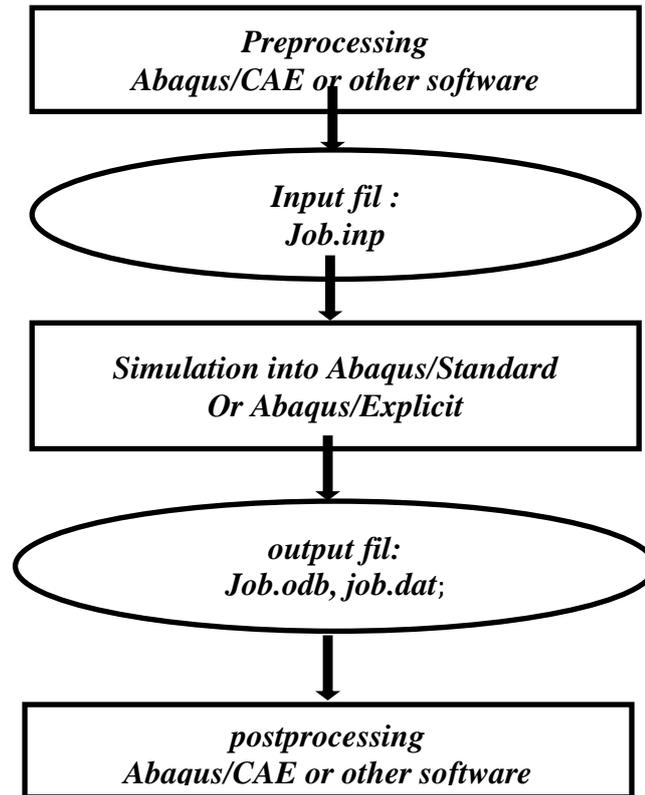


Figure III-1 Diagramme de fonctionnement de l'ABAQUS.

### 3.1.1 Etapes de traitement par de logiciel ABAQUS :

#### 3.1.1.1 Prétraitement (Abaqus / CAE) :

Dans cette étape, vous devez définir le modèle du problème physique et créer un fichier d'entrée Abaqus. Le modèle est généralement créé graphiquement en utilisant Abaqus / CAE ou d'un autre préprocesseur, compatible avec d'autres logiciels de simulation.

#### 3.1.1.2 Simulation (Abaqus / Standard ou Abaqus / Explicit) :

La simulation, qui est normalement exécutée en tant que processus d'arrière-plan, est le stade dans lequel Abaqus / Standard ou Abaqus / Explicit résout le problème numérique défini dans le modèle. En fonction de la complexité du problème en cours d'analyse et la puissance de l'ordinateur utilisé, il peut durer de quelques secondes à quelques jours pour exécuter une simulation.[22].

**3.1.1.3 Post processeur (Abaqus / CAE) :**

L'évaluation des résultats peut être entamée une fois que la simulation a été terminée et les déplacements, contraintes, ou d'autres variables fondamentales ont été calculés. L'évaluation est généralement effectuée de manière interactive à l'aide du module de visualisation d'Abaqus / CAE ou d'une autre post processeur.

L'Abaqus / CAE est l'environnement qui fournit une interface simple et cohérente pour la création de modèles Abaqus.[22].

**3.2 Etapes de modélisation :**

Dans ce chapitre, une modélisation du comportement dynamique de la barre est effectuée pour permettre la détermination des fréquences propres et des déformées modales sans soudure et avec soudure.

**3.2.1 Plateforme de simulation et d'exécution :**

La simulation a été faite sous un ordinateur portable « HP ProBook 4520s » dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau suivant :

**Tableau III- 1 Caractéristiques de l'ordinateur de simulation.**

<b>Ordinateur portable HP ProBook 4520s - Caractéristiques détaillées</b>	
Modèle	480M
Processeur	<b>Intel® Core™ i5 cadencé jusqu'à 2,9 GHz en mode Turbo</b>
<b>Mémoire</b>	
<b>Capacité mémoire</b>	<b>4 Go</b>
Type	<b>SO-DIMM DDR3</b>
Fréquence	1066 MHz
<b>Affichage</b>	
Écran	15,6"
<b>Résolution</b>	WXGA (1366 x 768)
Carte graphique	<b>AMD Radeon HD 6370M</b>

Stockage	
Espace disque total	500 Go

### 3.2.2 Barre de référence :

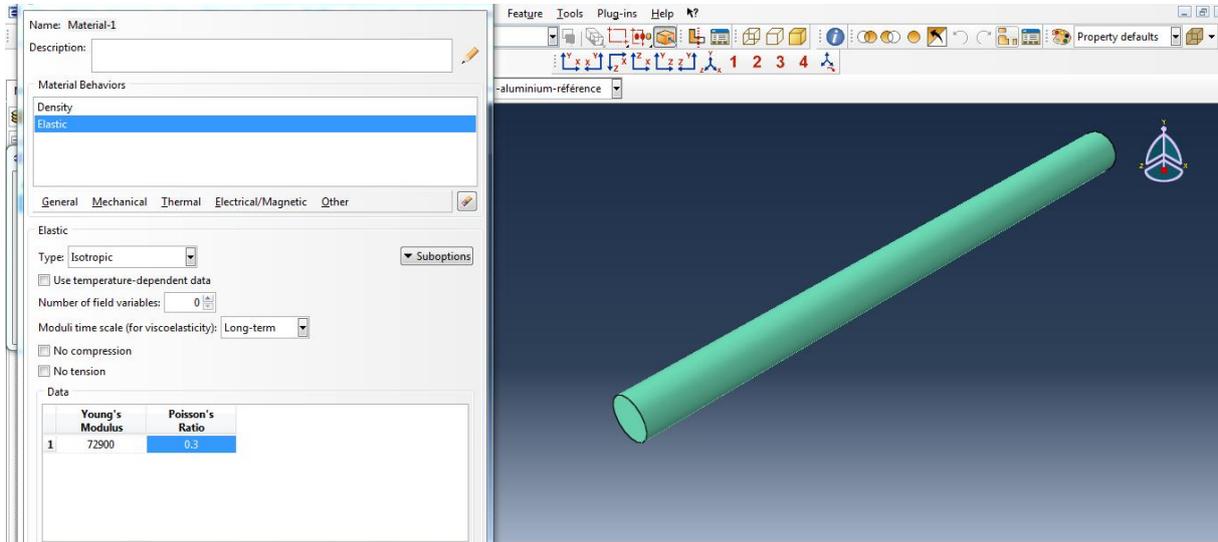


Figure III- 2 Configuration du matériau.

#### 3.2.2.1 Maillage de la pièce :

- **Barre de référence :** on a choisi un maillage structuré simple de type « Hexaédrique ».

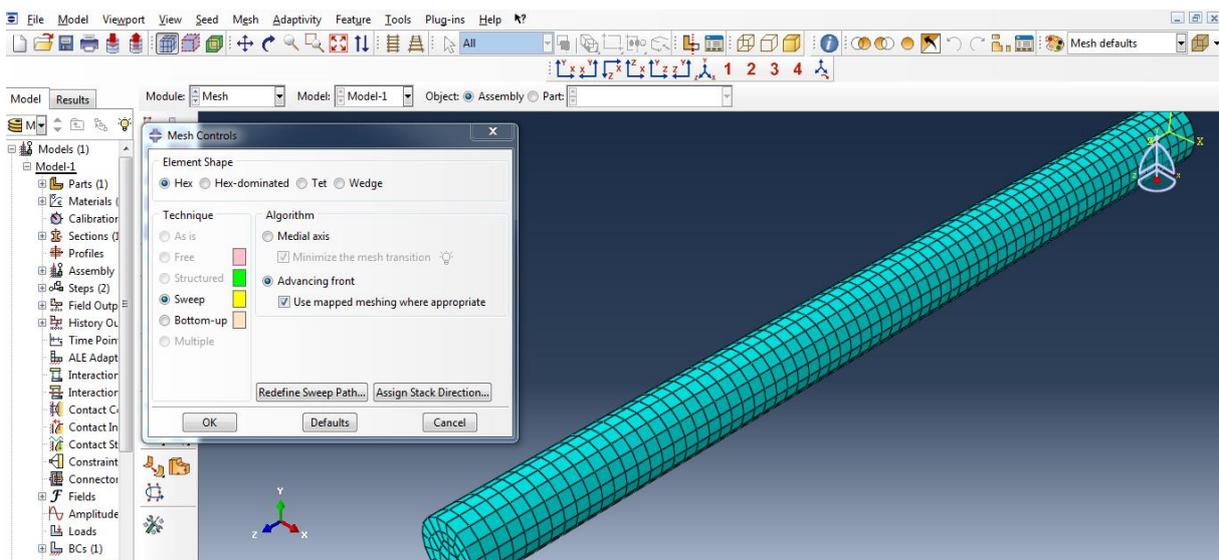


Figure III- 3 Maillage de la barre de référence (non soudée).

- **Barre soudée** : on a choisi un maillage plus fin « tétraédrique » à cause de la complexité de la modélisation des les trois (3) zones principales du cordon de soudure.

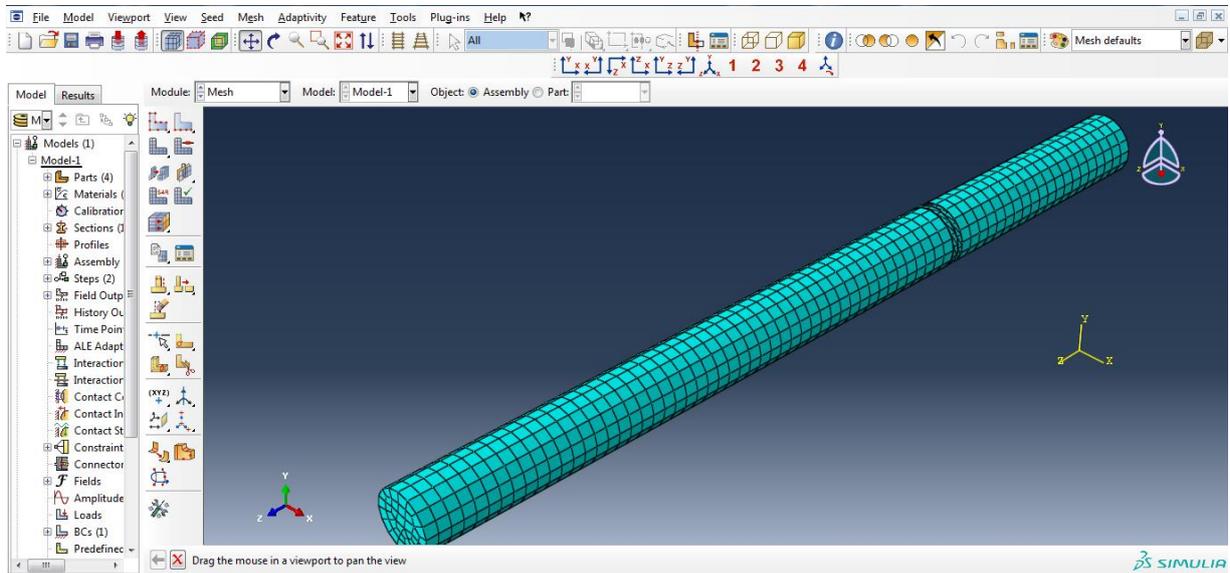


Figure III- 4 Maillage de la barre soudée.

Tableau III- 3 Propriétés et statistiques de la barre de référence

Statistiques	
Nœuds	2911
Eléments	2240

Tableau III- 4 Propriétés et statistiques de la barre soudée

Statistiques	
Nœuds	3687
Eléments	2622

## 3.2.2.2 Les conditions aux limites :

Dans notre cas la barre est encastré-libre.

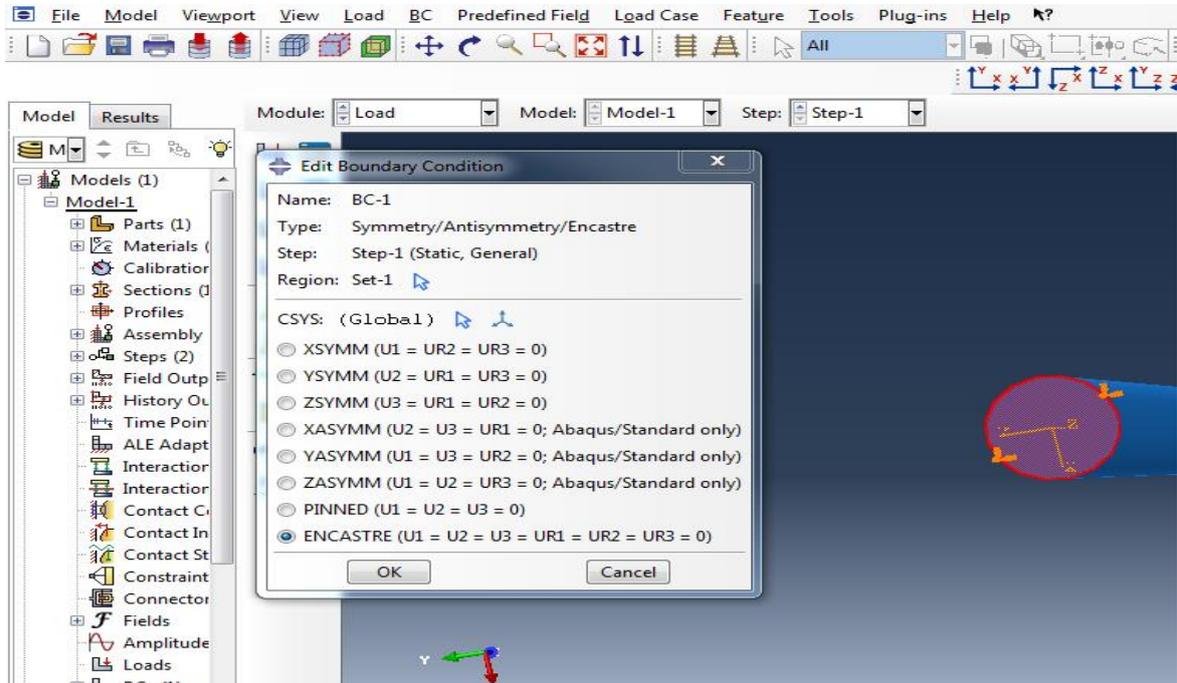


Figure III- 5 Fixation d’une extrémité de la barre

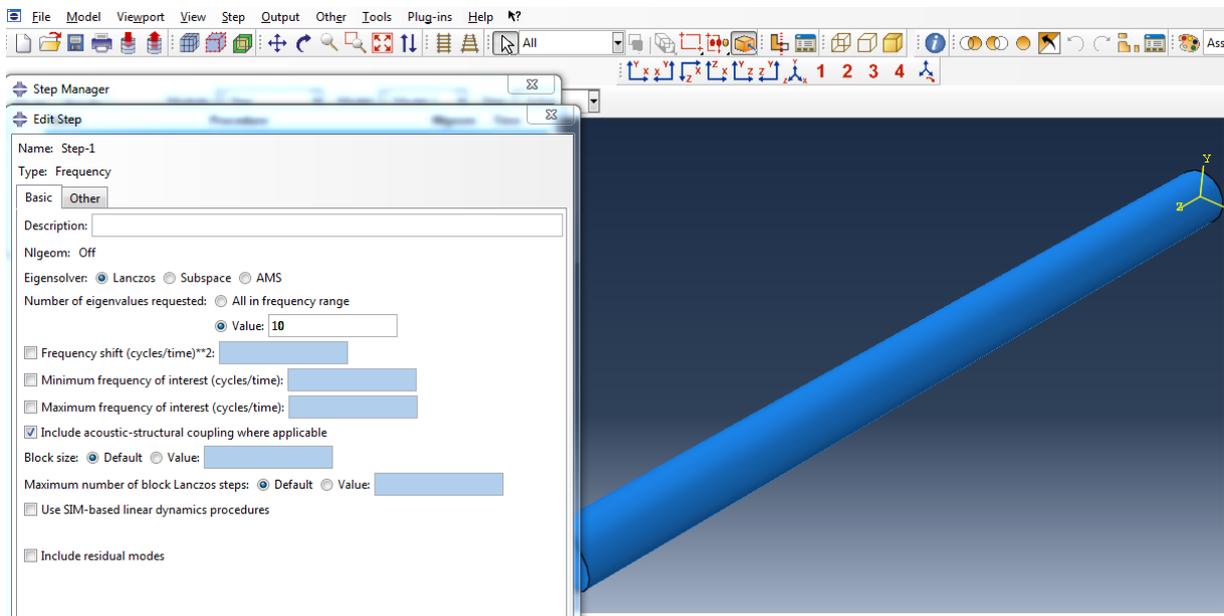


Figure III- 6 Choix du type de simulation (fréquentielle).

### 3.3 Résultats :

Le résultat de la modélisation sous ABAQUS nous donne tous les modes (mode de vibration longitudinale, de flexion). Pour pouvoir les distinguer il faut afficher la déformée de tous les modes.

#### 3.3.1 Cas de la barre de référence (non soudée) :

##### 3.3.1.1 Premier mode propre :

La première déformation par rapport à la ligne de référence comme indique la figure.III.7

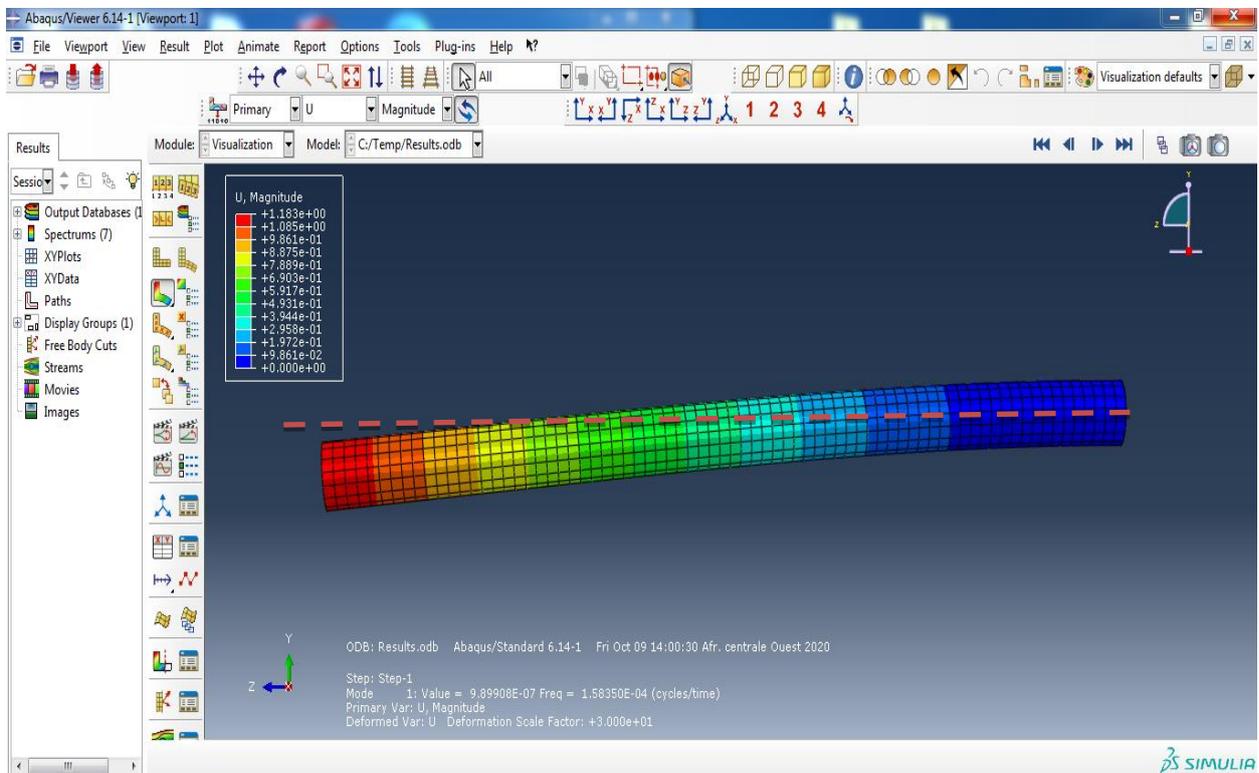
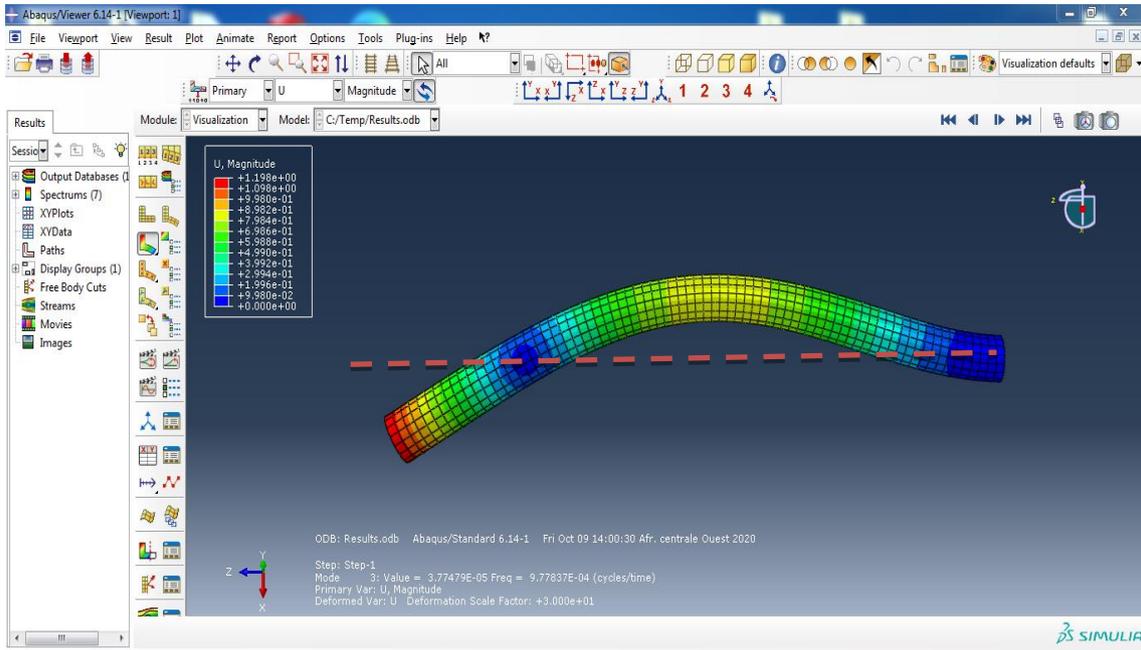


Figure III-7 Mode propre d'ordre 1.

### 3.3.1.2 Deuxième mode propre :

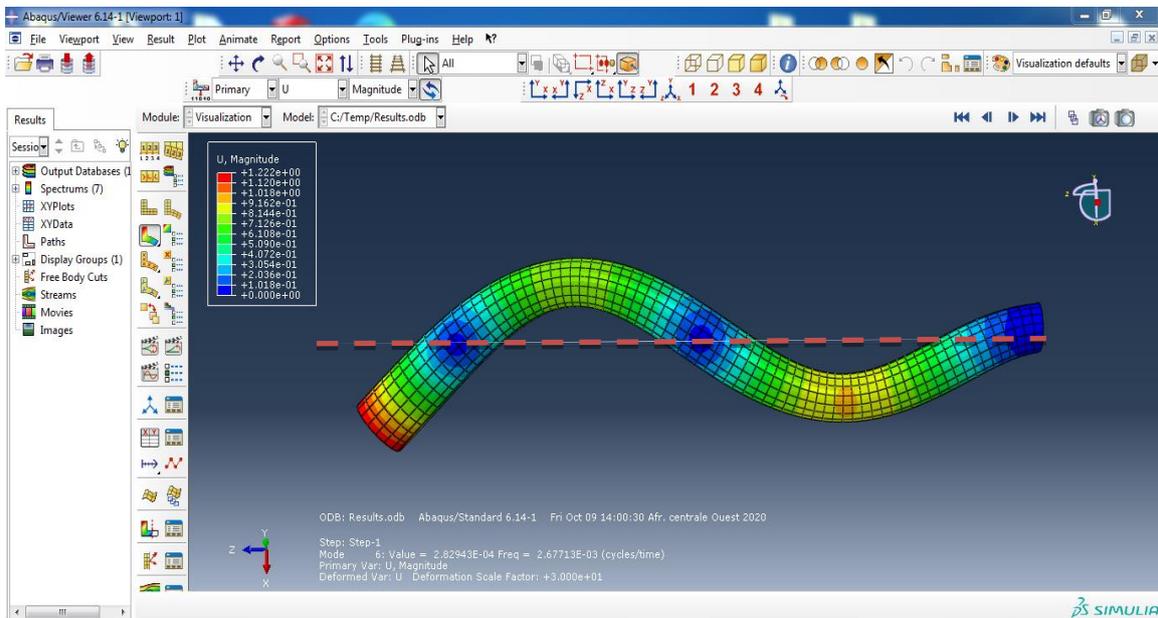
La deuxième déformation para port à la ligne de référence comme indique la **figure.III.8**.



**Figure III- 8 Mode propre d'ordre 2.**

### 3.3.1.3 Troisième mode propre :

La troisième déformation para port à la ligne de référence comme indique la **figure.III.9**.



**Figure III- 9 Mode propre d'ordre 3.**

## 3.3.2 Cas de la barre soudée :

Le cas d'une barre soudée est représenté dans figure III.10, qui illustre l'hétérogénéité du matériau suite au procédé de soudage FSR (définition des propriétés mécaniques des différentes zone à savoir le MB, ZAT, ZATM).

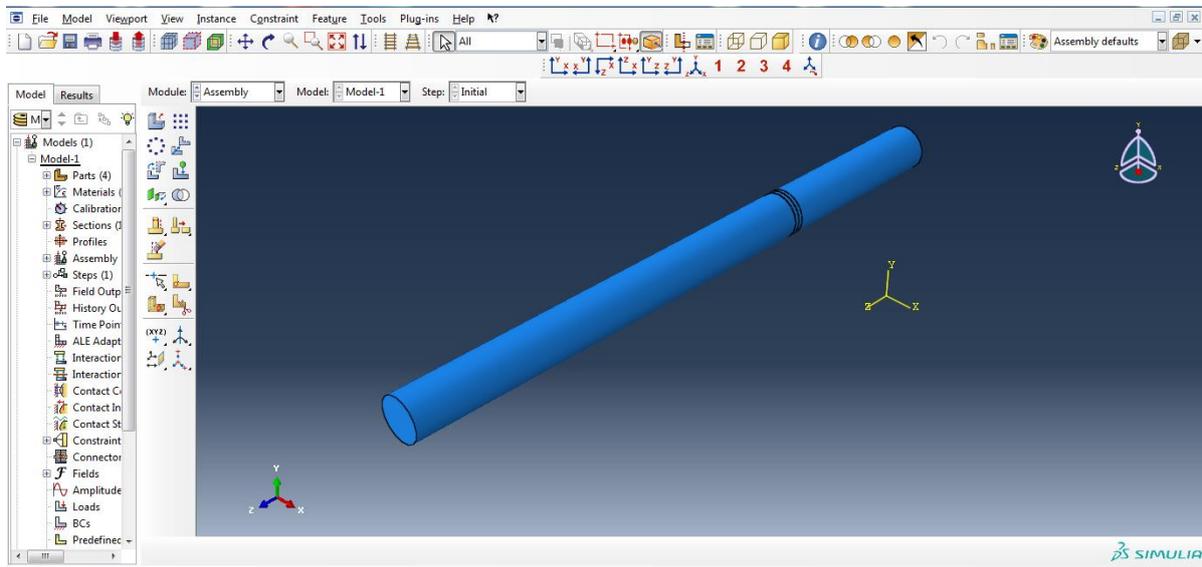


Figure III- 10 Barre soudée.

### 3.3.2.1 Premier mode propre :

La figure ci-dessous illustre la déformation de la barre sous le mode propre d'ordre un (1).

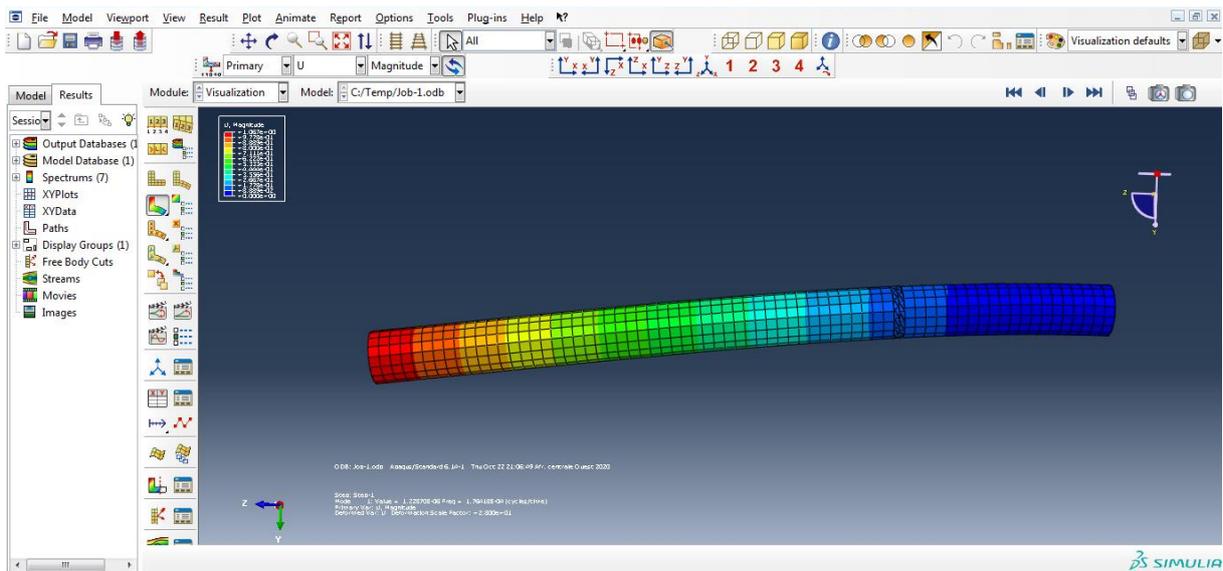


Figure III- 11 Mode propre d'ordre 1 (barre soudée).

### 3.3.2.2 Deuxième mode :

La figure ci-dessous illustre la déformation de la barre sous le mode propre d'ordre deux (2).

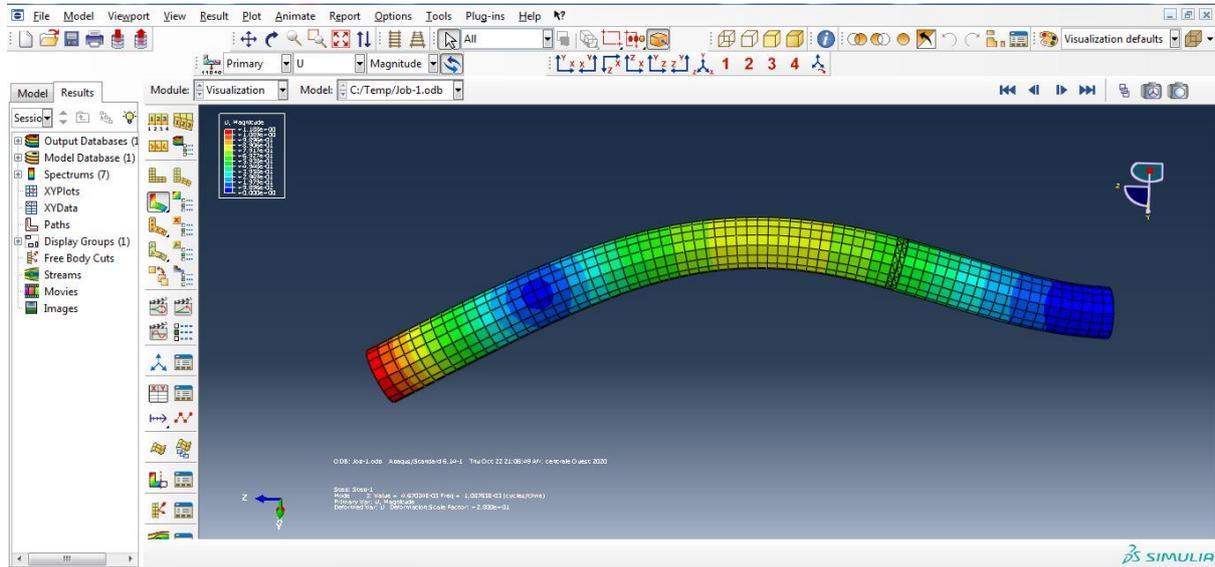


Figure III- 12 Mode propre d'ordre 2 (barre soudée).

### 3.3.2.3 Troisième mode :

La figure ci-dessous illustre la déformation de la barre sous le mode propre d'ordre trois (3).

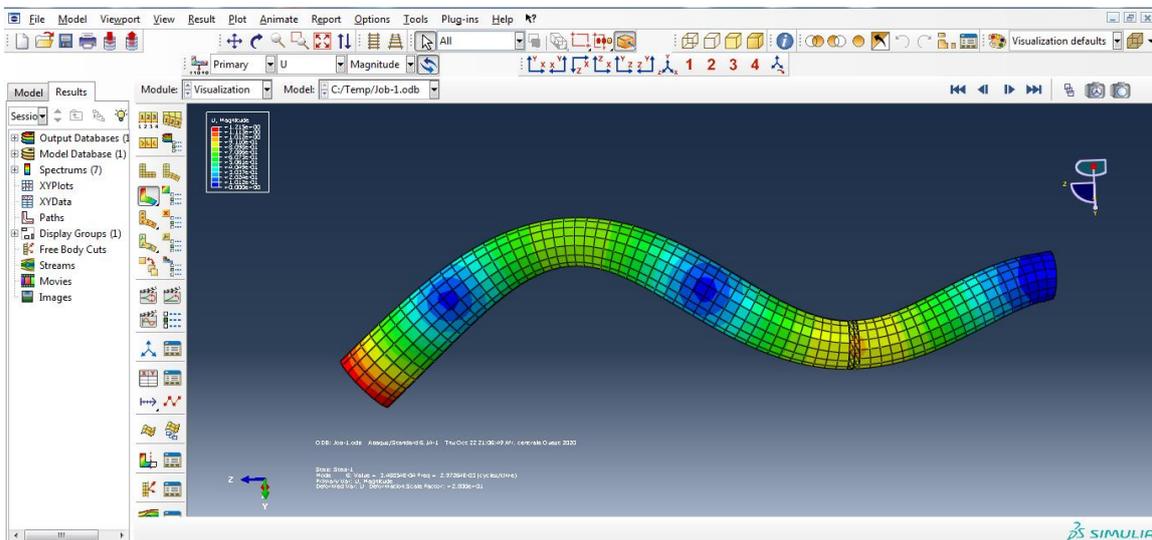


Figure III- 13 Mode propre d'ordre 3 (barre soudée).

### 3.4 Interprétation

Ce tableau représente les différentes valeurs des fréquences propres trouvées lors de simulation.

**Tableau III- 5 Comparaison entre les valeurs des fréquences propres.**

	Méthode de résolution	Modes		
		1	2	3
Fréquence (Hz)	Barre de référence	77.99	483.85	1004.30
	Barre soudée	78.074	484.30	1007.40
Taux d'erreur (%) $\left  \frac{f_1 - f_2}{100} \right $		0.00084	0.0045	0.031

- D'un point de vue fréquentiel on constate que les résultats des deux barre (non soudée et soudée) sont presque identiques sur tous les modes représentés avec un taux d'erreur minimal.

### 3.5 Conclusion :

Après simulation du comportement de la barre sous ABAQUS, les résultats sont comparés à ceux de la théorie et par la suite ces derniers seront validés par une étude d'analyse modale expérimentale.

# *Chapitre 4 :*

## *Etude expérimentale*

## 4.1 Principe :

Le choc est appliqué à la structure au moyen d'un marteau. L'énergie cinétique du marteau donne naissance au moment de l'impact à une force dont on mesure l'intensité par une cellule qui délivre un signal électrique qui constitue l'entrée du système. La réponse du système est mesurée par un accéléromètre fixé sur la structure. L'analyseur calcule alors la fonction de transfert et les déformées modales.

## 4.2 Technique de mesure :

Deux techniques peuvent être indifféremment mises en œuvre :

- Dans la première, l'utilisateur excite la structure en un point donné fixe et mesure les réponses en un certain nombre de points préalablement sélectionnés. Les informations force et accélération sont alors envoyées sur les entrées d'un analyseur, ce qui permet de déterminer les fonctions de transfert pour chacun des points de mesure et la déformée pour l'ensemble des points.
- Dans la deuxième, l'utilisateur fixe le capteur en un point et excite la structure en divers endroits. Comme précédemment, il peut déterminer les fonctions de transfert et les déformées.

Dans notre travail on a utilisé la deuxième technique sachant que l'ensemble des essais expérimentaux a été effectué au niveau de l'Unité de Recherche Développement Mécanique Aéronautique « **CRD-MA** ».

## 4.3 Matériels et logiciels utilisés :

### 4.3.1 Présentation du matériel utilisé :

#### 4.3.1.1 Excitateurs, Capteurs de mesure :

Dans notre étude, nous avons choisi le marteau d'impact comme moyen d'excitation de la barre à étudier et un capteur d'accélération (accéléromètre) pour la mesure de sa réponse vibratoire. [**CRD-MA**].

##### 4.3.1.1.1 Marteau d'impact :

Nous avons utilisé pour l'excitation de la barre en aluminium (2017A) et acier (A60) le marteau d'impact de référence 5800 B 5 numéro de série : 3939.

Le tableau suivant représente les caractéristiques techniques du marteau que nous avons utilisé dans notre étude modale. [Doc CRD/MA].

**Tableau IV- 1 Caractéristiques techniques du marteau d'impact.**

<b>Sensibilité (mV/N)</b>	1.16	<b>Fréquence de résonance(Hz)</b>	75
<b>La gamme d'utilisation(N)</b>	4450	<b>Impédance max de sortie (<math>\Omega</math>)</b>	100
<b>La force maximale (N)</b>	9900	<b>Source d'alimentation (V)</b>	+18 à 30
<b>Humidité (%)</b>	36	<b>Intensité (mA)</b>	2 à 20
<b>Température (°C)</b>	22	<b>Matériau (Tête, poignet)</b>	Acier inoxydable, Fibre de verre
<b>Connecteur(Coaxial)</b>	BNC	<b>Poids tête(g)</b>	100

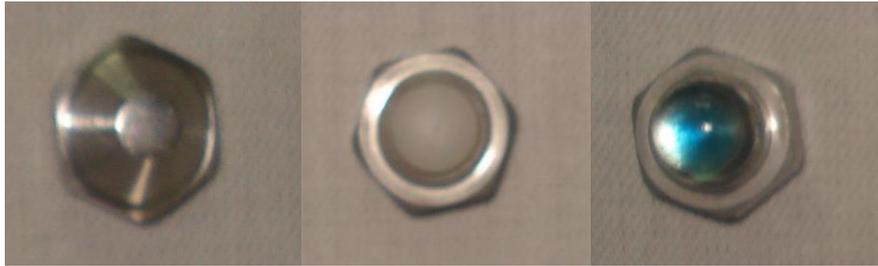


**Figure IV- 1 Marteau d'impact.**

Un marteau d'impact est constitué d'une masse, d'un capteur de force et d'un embout plus ou moins dur selon les fréquences que l'on veut exciter. Lorsqu'on utilise un marteau d'impact, la force (crête) d'impact est proportionnelle à la masse du marteau et à la vitesse d'impact. [Doc CRD/MA].

**a) Accessoires :**

- Embout modèle 6250A (Aluminium) ;
- Embout modèle 6250P (Plastique dur) ;
- Embout modèle 6250PS (plastique mou).



**Figure IV- 2 Types d'embouts.**

**b) Effet de l'embout du marteau :**

La durée de l'impulsion est contrôlée par la masse et la rigidité du marteau et de son embout ainsi que de celle de la structure. Lorsqu'on frappe sur une structure rigide, la dureté de l'embout commande la forme du spectre et la gamme opérationnelle en fréquence **Figure.I.8.**

**4.3.1.1.2 Accéléromètre :**

Pour la mesure de la réponse vibratoire de la barre à étudier, nous avons utilisé l'accéléromètre de référence Wilcoxon est du modèle 736T, et son numéro de série : 13713 (Fig IV.3).



**Figure IV- 3 Accéléromètre (Wilcoxon 736T).[Doc CRD/MA].**

Le tableau ci-dessous représente les caractéristiques techniques :

**Tableau IV- 2 Caractéristiques techniques, accéléromètre (Wilcoxon 736T).**  
[Doc CRD/MA].

Sensibilité (mV/g)	102
Sensibilité transversale relative (%)	4
Fréquence de résonance (kHz)	42.9
Plage de mesure(Hz)	2 à 27400
Gamme de fréquences (Hz)	5 à 20000
Amplitude maximale (g peak)	50

#### 4.3.2 Acquisition & traitement des signaux :

Dans le but d'acquérir et d'analyser les signaux délivrés par les deux capteurs ; capteur de force et capteur d'accélération, nous avons utilisé une plateforme d'analyse vibratoire « **SPECTRAL DYNAMICS** ». Ce système est composé de :[Doc CRD/MA].

- Carte d'acquisition ;
- PC ;
- Logiciels d'acquisition et traitement des données.



**Figure IV- 4 Système d'analyse modale expérimentale.**

#### 4.3.2.1 Carte d'acquisition :

L'objectif principal de l'utilisation de la carte d'acquisition est le transfert des signaux provenant des capteurs au PC pour les analyser. Elle est utilisée pour accomplir les tâches suivantes :[Doc CRD/MA].

- Gestion des voies de mesure ;
- Acquisition des signaux ;
- Conditionnement des signaux ;
- Échantillonnage et numérisation des signaux (analogique-numérique).

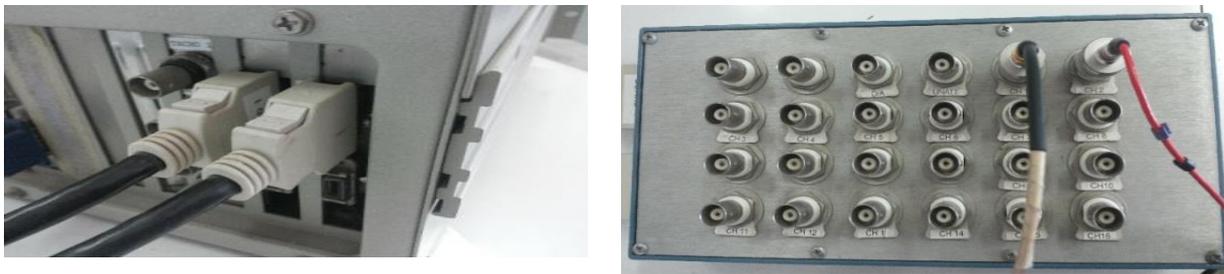


Figure IV- 5 Carte d'acquisition & block de connexion.

#### 4.3.2.2 Ordinateur principal :

Le PC est utilisé d'une part comme un support pour les cartes d'acquisition de type PCI, et d'autre part pour l'installation des logiciels d'acquisition et traitement des données.[Doc CRD/MA].

Les caractéristiques principales du PC que nous avons utilisé dans notre étude sont :

- PC industriel modèle SD2420-9710 équipé d'un bloc de connexion de 16 voies d'acquisition.
- Microprocesseur Intel 3.0 GHz.
- RAM 1G.
- Carte graphique Ge Force 6600 GT de mémoire interne 256 Mo.
- Système d'exploitation : Microsoft Windows XP.

### 4.3.2.3 Logiciels utilisés :

Le système d'analyse modale expérimentale de la société SPECTRAL DYNAMICS est doté par deux logiciels ; PUMA & CATSMODAL. Ces derniers ont pour but d'effectuer les opérations suivantes :

- Acquisition des signaux (réponse et excitation) ;
- Analyse et traitement des signaux acquis ;
- Visualisation des signaux dans l'écran du PC ;
- Enregistrement des signaux sous différents formats (.SDD ou UFF) ;
- Extraction des paramètres modaux via les fonctions de réponse en fréquence (FRFs),
- Visualisation des déformées modales des structures (animation).

#### 4.3.2.3.1 PUMA :

Le logiciel PUMA est utilisé pour l'acquisition et le traitement des signaux délivrés par le capteur de force et d'accélération afin de calculer les Fonctions de Réponse en Fréquence (FRFs).[Doc CRD/MA].

Le logiciel PUMA inclut également les fonctionnalités suivantes :

- Analyseur (mesure vibratoire générale).
- Diagnostic des machines tournantes.

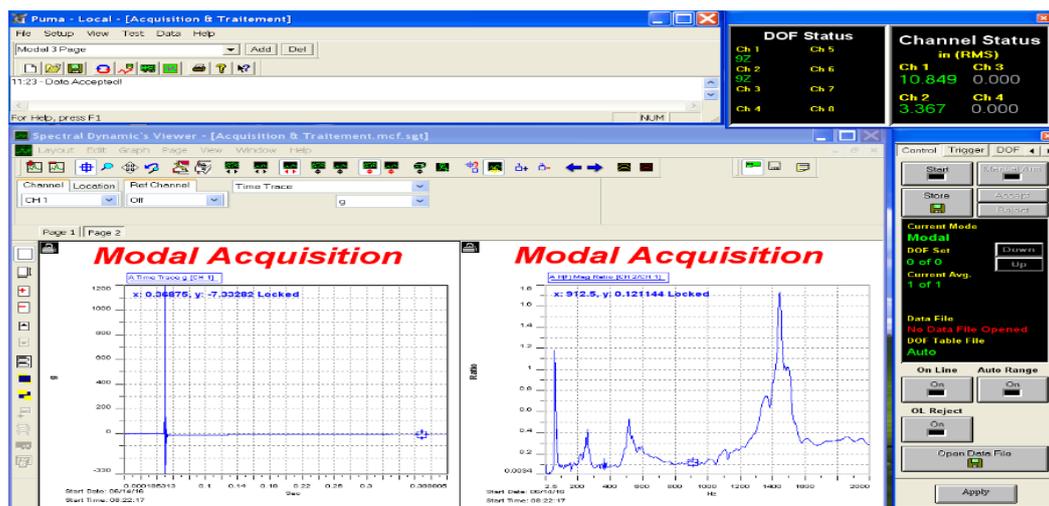


Figure IV- 6 Logiciel PUMA.

#### 4.3.2.3.2 CATS MODAL :

Le logiciel CATSMODAL consiste d'une part à déterminer les fréquences propres et les amortissements (paramètres modaux) à partir des fonctions de réponse en fréquence (FRFs) calculées par le logiciel PUMA. Et d'autre part, à visualiser les déformées modales correspondantes aux différentes fréquences propres de la structure (animation).

[Doc CRD/MA].

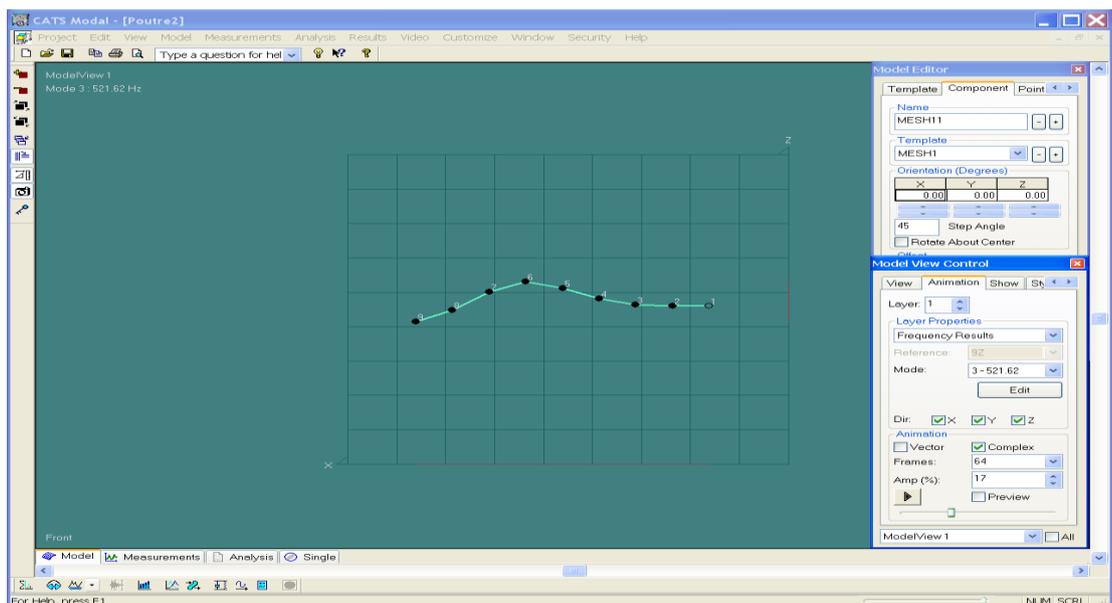


Figure IV- 7 Logiciel CATSMODAL.

### 4.4 Partie expérimentale :

#### 4.4.1 But de l'étude :

Il s'agit tout d'abord d'étudier le comportement vibratoire en déterminant les paramètres dynamiques d'une barre en Aluminium (2017A) et barre en acier (A60) de refaire l'essai une fois la barre coupée et soudée par la technique de RFW.

Nous pouvons résumer les objectifs visés dans cette analyse modale expérimentale de la barre en aluminium et en acier dans les points suivants :

- Détermination des fréquences propres et l'amortissement d'une barre en aluminium et barre en acier.
- Visualisation des déformées modales correspondantes aux fréquences propres.

#### 4.4.2 Étapes d'analyse modale expérimentale :

##### 4.4.2.1 Mode de fixation & Discrétisation de la barre :

Avant de commencer notre analyse modale expérimentale, nous avons réalisé le mode de fixation Encasturé-Libre de la barre à l'aide d'un support de fixation. Ensuite, nous avons discrétisé la barre en onze (11) points à des distances équidistantes.

La barre a les caractéristiques géométriques et massiques suivantes :

##### Aluminium (2017A) :

- Longueur : 300 mm avant l'encastrement et 280 mm après l'encastrement
- Epaisseur : 10 mm
- $\mu = 2.8e-009 \text{ kg mm}^{-3}$
- $M = 0.075 \text{ kg}$
- $E = 72900 \text{ Mpa}$



Figure VI-8 Barre (2017A) non soudé.



Figure VI-9 Barre (2017A) soudé.

##### Acier (A60) :

- Longueur : 300 mm avant l'encastrement et 280 mm après l'encastrement
- Epaisseur : 10 mm
- $\mu = 7.8e-009 \text{ kg mm}^{-3}$
- $M = 0.195 \text{ kg}$
- $E = 210000 \text{ Mpa}$



Figure VI-10 Barre acier (A60) non soudé. Figure VI-11 Barre acier (A60) soudé.

#### 4.4.2.2 Réglage des paramètres d'acquisition sur PUMA :

L'étape de l'acquisition des signaux délivrés par les deux capteurs nécessite le réglage de certains paramètres dans le logiciel PUMA :

- Nombres des points de mesures ;
- Intervalle fréquentiel (bande fréquentielle pour la recherche des modes propres);
- Sensibilité du capteur de force et d'accélération ;
- Position du capteur d'accélération.

The screenshot shows the PUMA software interface. The main window displays a 'Channel Definition' table with the following data:

Name	Serial #	Type	Engineering Units	Sensitivity (mv/Unit)	Transducer Units	ICP	Coupling	Voltage	dB Reference	Location	Direction
1 CH 1		Ref / Measure	N	1.160 N		On	AC	Auto	1	1 Z	
2 CH 2	736T 13713	Measure	g	102.000 g		On	AC	Auto	1	8 Z	
3 CH 3		Inactive	g	102.000 g		Off	Ground	Auto	1	3 Z	
4 CH 4		Inactive	g	97.000 g		Off	Ground	Auto	1	4 Z	
5 CH 5		Inactive	g	100.000 g		Off	Ground	Auto	1	5 X	

Additional panels in the interface include 'DOF Status' and 'Channel Status'. The 'Channel Status' panel shows RMS values for channels 1, 2, 3, and 4.

**Figure IV- 8 Réglages des sensibilités (capteur et marteaux) et leurs emplacements.**

La fenêtre suivante représente les paramètres de réglage que nous avons introduit dans le logiciel PUMA pour l'acquisition des signaux :

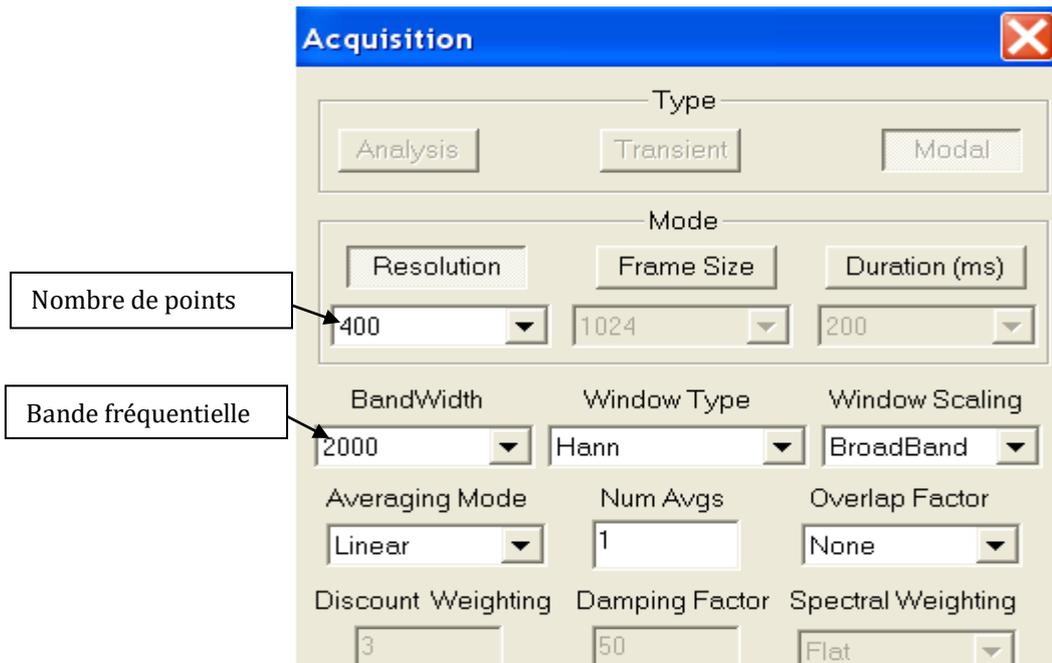


Figure IV- 9 Paramètres d'acquisition.

#### 4.4.2.3 Excitation et mesure de la réponse :

Après avoir réglé les paramètres d'acquisition. Nous avons excité les neuf points à l'aide du marteau d'impact et mesuré en même temps la réponse de la barre à travers de l'accéléromètre.



Figure IV- 10 Excitation de la barre.

#### 4.4.2.4 Calcul des FRFs :

Les deux signaux (force & accélération) sont acquis par la suite et analysés par le logiciel PUMA afin de calculer les fonctions de réponse en fréquence (FRFs). Ces fonctions seront enregistrées sous le format des fichiers .SDD (SPECTRAL DYNAMICS DATA).

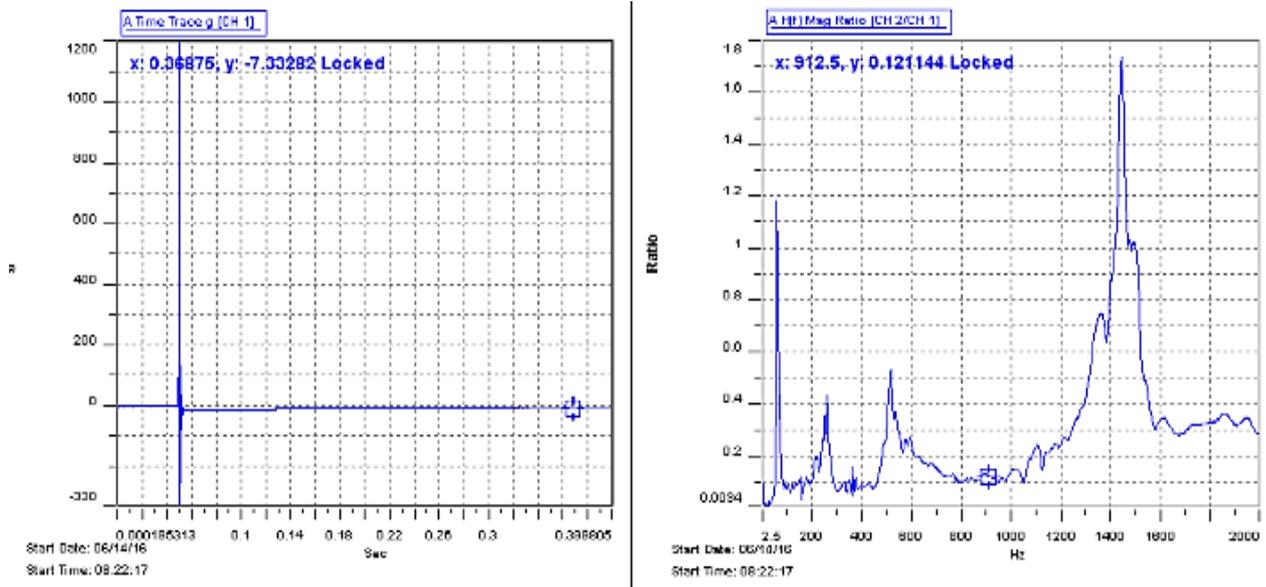


Figure IV- 11 Signal d’excitation & FRF.

**4.4.3 Détermination des paramètres modaux :**

**a) Modèle géométrique :**

La première étape de la détermination des paramètres modaux consiste à modéliser géométriquement la barre à étudier. Nous soulignons que le modèle géométrique appliqué pour la modélisation de la barre sous le logiciel CATSMODAL est une présentation linéaire de la barre sous forme de plusieurs segments droits de même longueur et nombre de points de discrétisation que la barre.

**b) Importation des fichiers des FRFs :**

Cette étape consiste à importer les fichiers des FRFs calculées par le logiciel PUMA. Et d’assigner chacune de ces fonctions au point correspond.

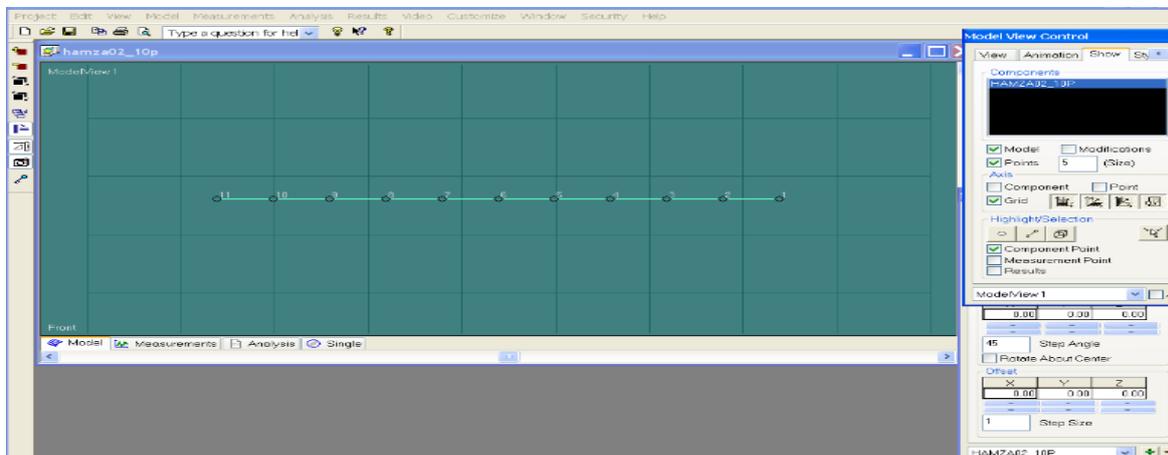


Figure IV- 16 Importation des fichiers des FRFs.

#### 4.4.3.1 Cas de la barre de référence :

##### 4.4.3.1.1 Lissage des courbes :

Le lissage des courbes permet de redessiner ces dernières de manière à faciliter l'extraction des modes propres (les pics).

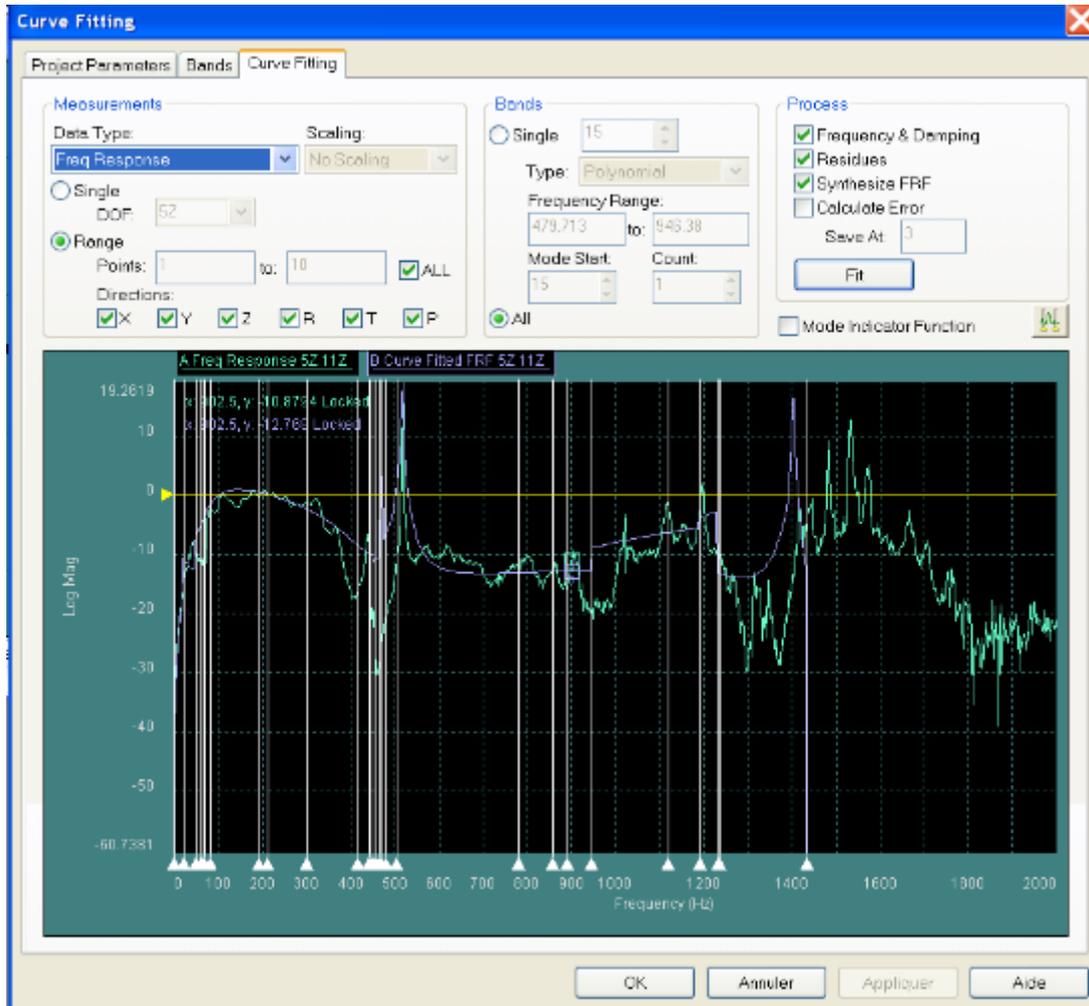


Figure IV- 17 Lissage des courbes.

#### 4.4.3.1.2 Détermination des modes propres :

Après traitement des courbes des FRFs (curve-fitting), nous avons utilisé la technique polynomiale pour la détermination des fréquences propres. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante :

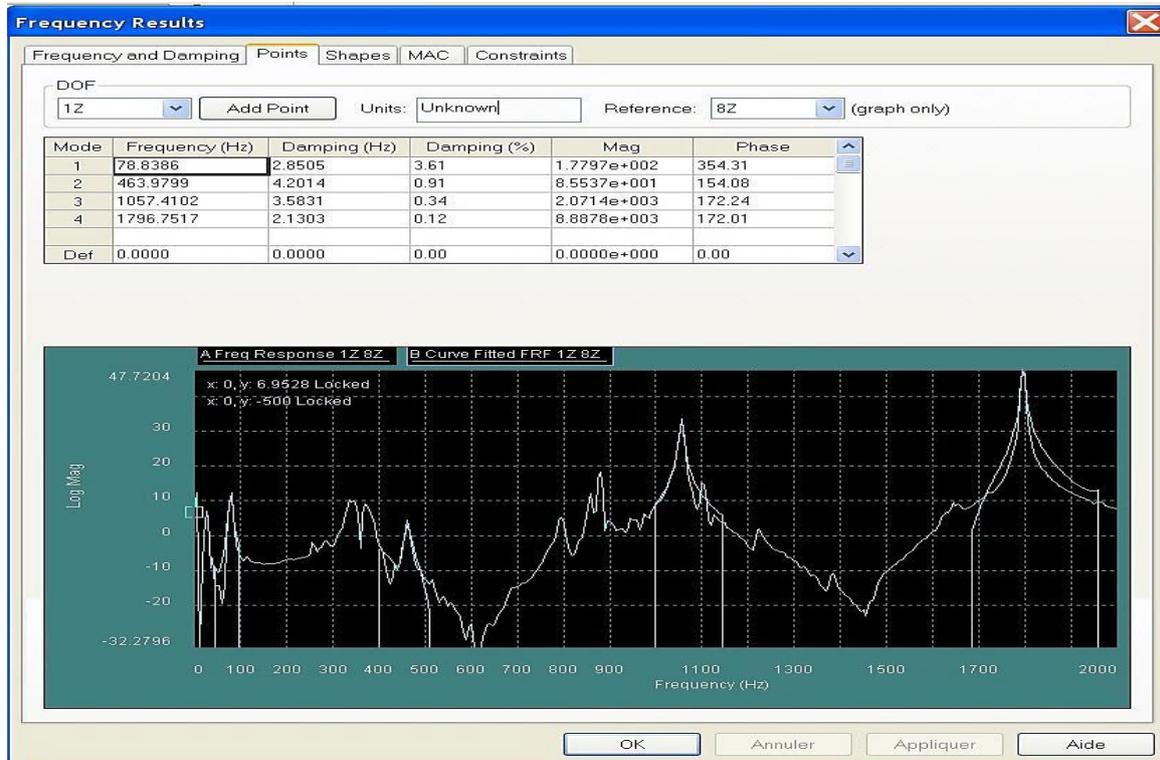


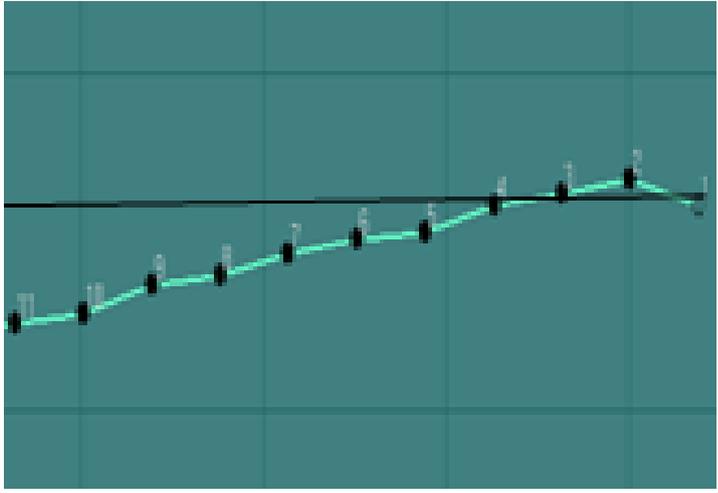
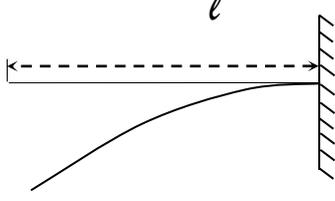
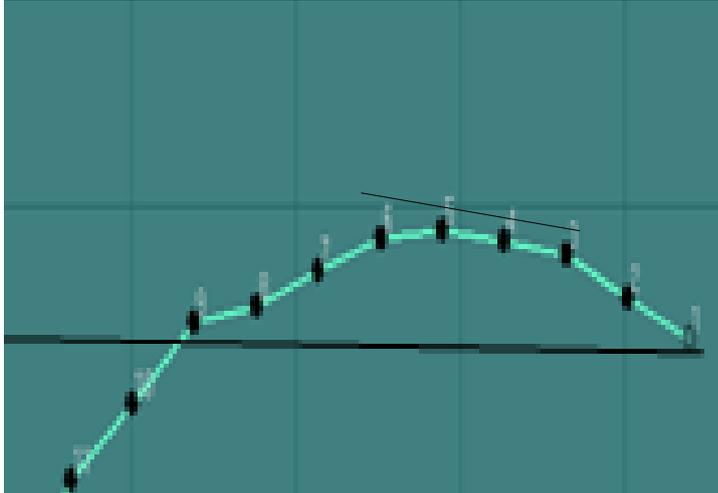
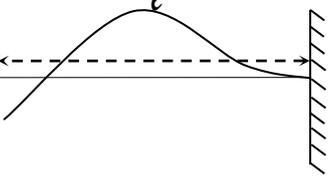
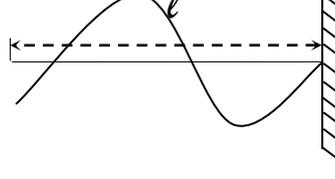
Figure IV- 18 Paramètres modaux.

#### 4.4.3.1.3 Déformées modales :

L'intérêt du logiciel CATSMODAL est la visualisation des déformées modales correspondantes aux modes propres de la plaque étudiée après transfert et traitement des données.

Le tableau suivant représente une comparaison entre les déformées modales obtenues expérimentalement et les déformées théoriques :

Tableau IV- 3 Déformées appropriés aux différents modes propres de barre non soudée.

Mo de	Fréquence propre Hz)	Déformées expérimentales	Déformées théoriques
1	78.84		
2	463.98		
3	1057.41		

4.4.3.2 Barre soudée en RFW :

4.4.3.2.1 Lissage des courbes :

Le lissage des courbes permet de redessiner ces dernières de manière à faciliter l'extraction des modes propres (les pics).

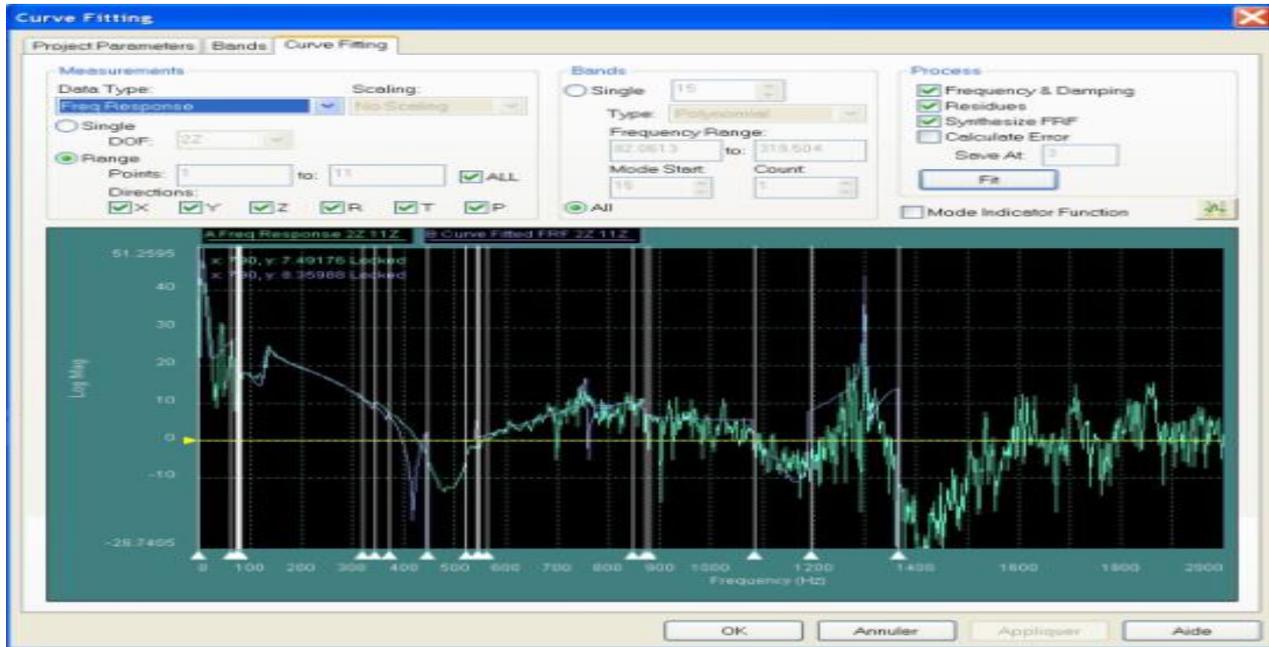


Figure IV- 19 Lissage des courbes.

4.4.3.2.2 Détermination des modes propres :

Après traitement des courbes des FRFs (curve-fitting), nous avons utilisé la technique polynomiale pour la détermination des fréquences propres. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante :

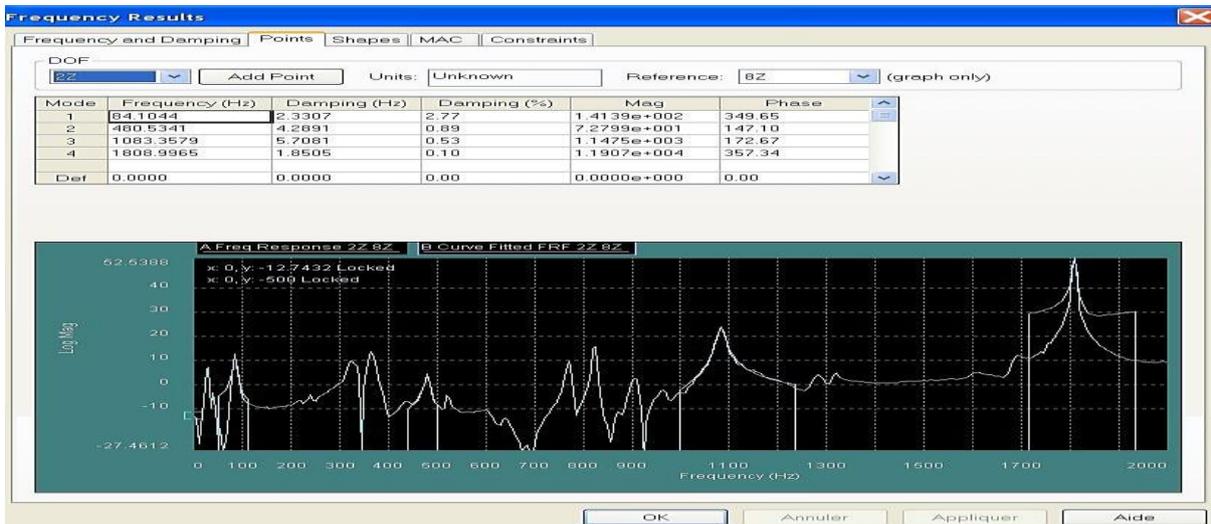
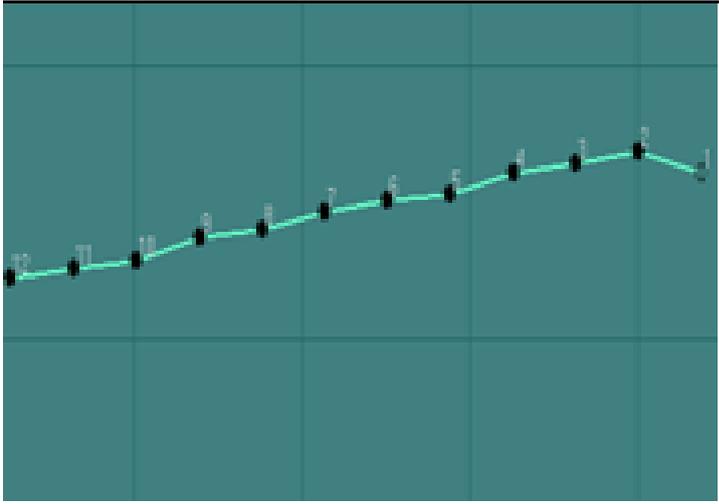
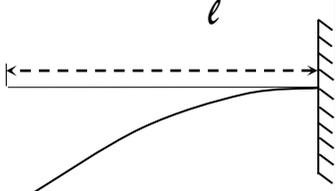
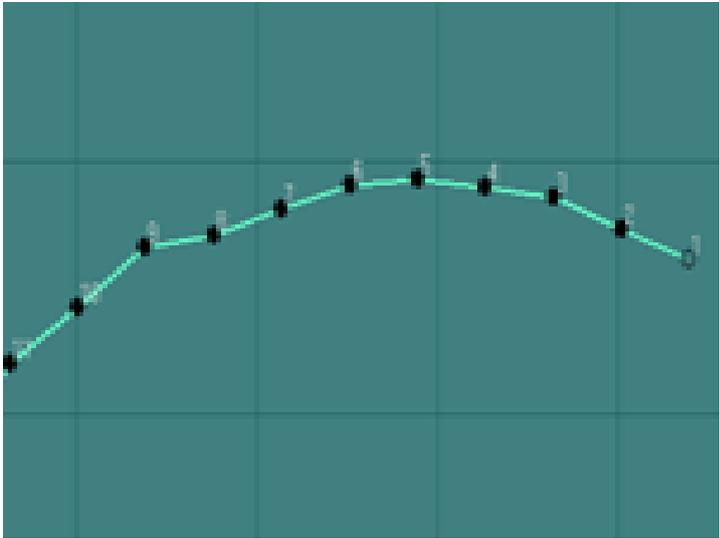
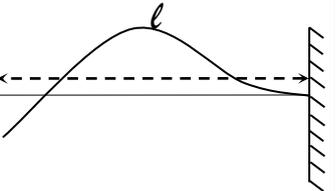


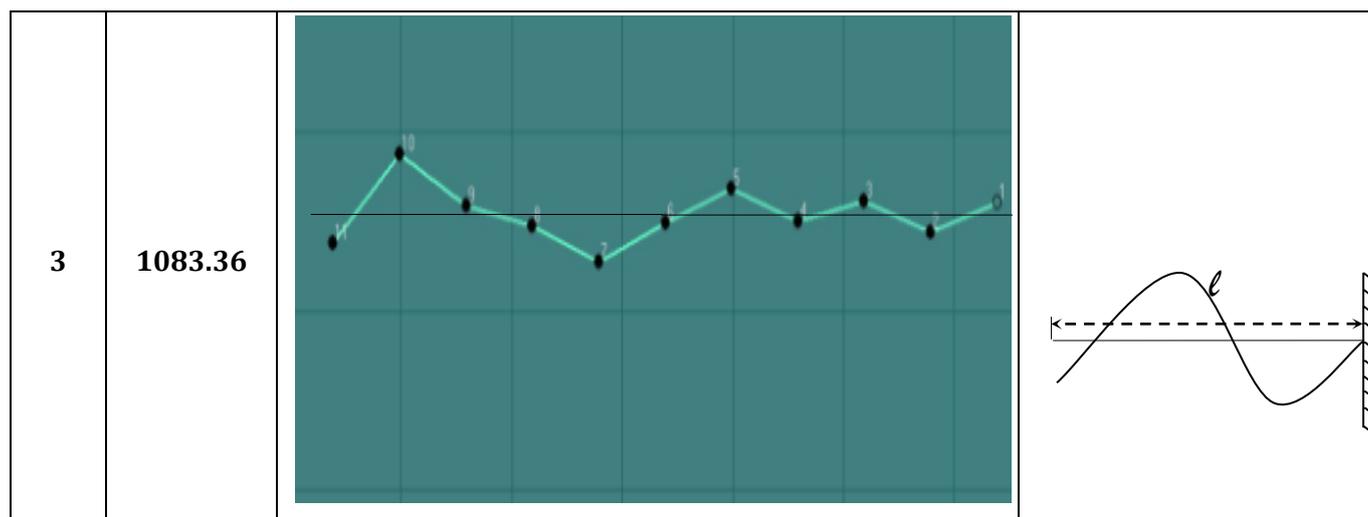
Figure IV- 20 Paramètres modaux.

4.4.3.2.3 Déformées modales :

Le tableau suivant représente une comparaison entre les déformées modales obtenues expérimentalement et les déformées théoriques :

Tableau IV- 4 Déformées appropriés aux différents modes propres de barre soudée.

Mode	Fréquence propre (Hz)	Déformées expérimentales	Déformées théoriques
1	84.10		
2	480.53		



#### 4.5 Résultats expérimentaux et discussion :

Le tableau ci-dessous présente les paramètres dynamiques des deux barres ( non soudées et soudée ).

**Tableau IV- 5 Résultats expérimentaux.**

mode	Barre de référence			Barre soudée		
	Fréquence propre Hz	Amortissement Hz	Amortissement %	Fréquence propre Hz	Amortissement Hz	Amortissement %
Mode 1	<b>78.84</b>	2.8505	3.61	<b>84.10</b>	2.3307	2.77
Mode 2	<b>463.98</b>	4.2014	0.91	<b>480.53</b>	4.289	0.89
Mode 3	<b>1057.41</b>	3.5831	0.34	<b>1083.36</b>	5.7081	0.53

- D'après les résultats obtenus, on constate les paramètres dynamiques des deux barres (non soudée et soudée) presque identiques, en terme de fréquence et d'amortissement ;
- En observant les déformées modales des deux barres on remarque une similitude entre les différents modes propres pour ceux de l'étude expérimentale ainsi que ceux de la théorie sur tous les modes Ce qui confirme la véracité des résultats de l'analyse modale expérimentale.

#### 4.6 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques :

Le tableau IV.6 affiche les une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques ainsi que le calcul de taux d'erreur entre les deux méthodes.

**Tableau IV- 6 Résultats expérimentaux et numériques.**

mode	Barre de référence		Taux d'erreur (%) $\left  \frac{f_1 - f_2}{100} \right $	Barre soudée		Taux d'erreur (%) $\left  \frac{f_1 - f_2}{100} \right $
	EXPEREM- -ENTAL Fréq (Hz)	NUMERIQ- -UE Fréq (Hz)		EXPEREM- -ENTAL Fréq (Hz)	NUMERIQ- -UE Fréq (Hz)	
Mode 1	78.84	77.99	0.008	84.10	78.074	0.060
Mode 2	463.98	483.85	0.198	480.53	484.30	0.037
Mode 3	1057.41	1004.30	0.531	1083.36	1007.40	0.759

- Convergence des résultats entre les deux barre non soudée et soudée (taux D'erreur négligeable) implique que le procédé de soudage RFW n'affecte pas les paramètres dynamiques ainsi que le comportement vibratoire.

#### 4.7 Conclusion :

L'analyse modale expérimentale est utilisée pour valider des modèles de simulation numérique, à fin de faire les recalages nécessaires à la création de modèles fiables. Seulement, cette technique de validation nécessite une bonne maitrise du traitement du signal d'une part et des choix judicieux des points de mesure et d'excitation, représentatifs de l'ensemble de la structure. Les résultats obtenus ont été satisfaisants et en adéquation avec la littérature.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le soudage par friction rotative (RFW) est connu comme un processus d'assemblage à l'état solide qui implique rotation d'une pièce par rapport à une autre sous une force axiale, qui fusionne la pièce matériaux et déplacent plastiquement le matériau des surfaces de contact. Il est considéré comme le plus viable alternative pour surmonter les difficultés rencontrées dans les techniques d'assemblage conventionnelles. Puisque c'est un procédé de soudage en situation solide ; le processus ne forme pas une piscine fondue, éliminant ainsi défauts de solidification. Dans ce processus, l'énergie cinétique est convertie en énergie thermique pour obtenir de grande quantité de génération de chaleur intense localisée et de déformation élevée en produisant une soudure de haute qualité et coefficient de rendement exceptionnellement élevé. Nous avons donc moins de consommation d'énergie et très soudure, par rapport aux autres procédés de soudage.

Le procédé RFW offre de nombreux avantages pour les mêmes secteurs de fabrication pour une large gamme d'applications telles que les combinaisons de matériaux qui peuvent être soudés, alors qu'ils ne le sont pas avec techniques de soudage. Les soudures obtenues ont généralement un aspect similaire en ce qu'elles présentent plusieurs zones microstructurales distinctes : une zone centrale de soudure (WCZ) ou zone de pépite ; a thermo-mécaniquement zone affectée (TMAZ) et une zone affectée thermiquement (HAZ). RFW peut joindre deux matériaux différents ayant des propriétés mécaniques et thermiques différentes. Exemples : Assemblage aluminium-acier ou titane-cuivre ... Cette possibilité permet de réaliser des économies en ayant une conception judicieuse de ces pièces. Un exemple est la conception d'une soupape de moteur à combustion. La tête d'un matériau réfractaire est soudée à la tige de matériau résistant à l'usure et ainsi.

L'objectif de ce projet est l'étude du comportement dynamique d'une barre en aluminium aéronautique (2017 A) sous différentes configurations (non soudée et soudée), ce qui nous a permis de décrire cette barre en termes de ses caractéristiques naturelles qui sont les paramètres modaux, la fréquence modale, l'amortissement et la déformée modale, et bien évidemment d'exposer l'influence du soudage RFW sur ces derniers.

Les essais de traction montrent que les soudures ont une large plage de contraintes jusqu'à 637,13 MPa (plage élastique) pour Acier A60 ; et jusqu'à 115,78 MPa pour l'aluminium 2017A. Il est important de noter que la rupture lors des essais de traction pour la majorité des éprouvettes de traction s'est produite à l'extérieur du cordon de soudure, ce qui reflète la

qualité de la soudure obtenue, et le domaine plastique commence à partir de 570 MPa. Les essais de traction réalisés sur les éprouvettes Aluminium 2017A, présentent une bonne résistance mécanique et leurs caractéristiques mécaniques ( $R_e$  et  $R_m$ ) sont proches des caractéristiques données par la norme, donc les certificats de conformité. Dans l'ensemble, il a été constaté que les éprouvettes ont le temps de soudage le plus court ( $t = 30$  s) ont une meilleure traction courbe, quel qu'il soit en métal. Alors que les éprouvettes avec des vitesses de rotation plus élevées (1600 rd / mn) ont la meilleure limite de traction pour l'acier.

Le cas d'une barre soudée est représenté, qui illustre l'hétérogénéité du matériau suite au procédé de soudage RFW (définition des propriétés mécaniques des différentes zone à savoir le MB, ZAT, ZATM). En vue d'étudier théoriquement les modes propres.

Après cette Conception Assisté par Ordinateur proposée et élaborée, une étude numérique des deux barre (non soudée et soudée) a été réalisée sous le logiciel « **ABAQUS** », où les fréquences propres et les déformées modales correspondantes ont été obtenues.

Le résultat de la modélisation sous ABAQUS nous donne tous les modes (mode de vibration longitudinale et de flexion...). Pour pouvoir les distinguer il faut afficher la déformée de tous les modes propres (1 ; 2 et 3).

Aussi une analyse modale expérimentale a été effectuée sous une plateforme d'analyse vibratoire « **Spectral Dynamics** ».

- D'après les résultats obtenus, on constate les paramètres dynamiques des deux barres (non soudée et soudée) presque identiques, en termes de fréquence et d'amortissement ;
- En observant les déformées modales des deux barres on remarque une similitude entre les différents modes propres pour ceux de l'étude expérimentale ainsi que ceux de la théorie sur tous les modes Ce qui confirme la véracité des résultats de l'analyse modale expérimentale.
- Convergence des résultats entre les deux barre non soudée et soudée (taux D'erreur négligeable) implique que le procédé de soudage RFW n'affecte pas les Paramètres dynamiques ainsi que le comportement vibratoire.

Finalement, nous pouvons dire que les joints soudés RFW des alliages d'aluminium à durcissement structural d'une façon générale apparaissent donc comme une solution très prometteuse notamment pour l'industrie aéronautique.

Comme perspectives, il est intéressant de voir les possibilités de modélisation plus avancées pour des structures soudées plus complexes voir des couples différents à savoir des tronçons d'arbres de transmission etc.

Des études complémentaires restent envisageables, il serait intéressant de réaliser des essais de fatigue complémentaires pour pouvoir prédire l'influence du soudage RFW sur le comportement dynamique des structures au fils du temps.

## Bibliographies

- [1] Luc. Fairon, Introduction au soudage – Techni futur ASBL.
- [2] Helal, Y., thèse « L'effet de soudage par friction malaxage sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier ». Université MOHAMMED KHAIDER Biskra (2017).
- [3] Camille Routhier & Gilles Desjardins. WEMAN, Soudage et assemblage-soudage – Guide d'auto-apprentissage. Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI), Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2010
- [4] Merry, G., Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique de l'ingénieur, 10 janvier 1994 (M715).
- [5] Obtention des pièces mécano soudés (Soudage autogène). (12 avril 2018).
- [6] Barra lis, J., & Maeder, G. (2005). Les précis AFNOR/Nathan. Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, collection. (ISBN 978-2-09-1795829).
- [7] « Soudage-Coupage » (SYMOP). (24 avril 2018).
- [8] Anglade, B. ; Horisio Molinaro, H. ; Lavernhe, S., Technique de réalisation de Châssis micro-soudés : le soudage (03 février 2017). Ecole Normal Supérieure Paris-Saclay.
- [9] Philibert, J., Vignes, A., Bréchet, Y., & Combrade, P. (2013). Métallurgie. Du minerai au matériau, Technique et ingénierie / Mécanique et matériaux. Paris, Dunod, coll. 2ndéd.
- [10] Aissani, M., thèse « Etude du comportement thermique et mécanique des matériaux aéronautiques par des méthodes numériques : Application au soudage de structures métalliques ». Université SAAD DAHLAB DE BLIDA INSTITUT AERONAUTIQUE (15 septembre 2013).

- [11] Casez, R., Procédés de soudage : Principes généraux et critères de choix. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1995 (B7700).
- [12] Cazes, R., soudage par friction (10/02/1996). Techniques de l'ingénieur. . (24 avril 2018).
- [13] KUKA Industries FRICTION WELDING GERMANY 2016. (24 avril 2018).
- [14] « Soudage-Coupage » (SYMOP). (24 avril 2018).
- [15] Pichot, F. ; Cor pace, F., Conception et fabrication des moteurs aéronautiques (27/03/2014). Groupe SAFRAN (SNECMA).
- [16] Soudage par friction, CODE ISO : 42. (24 avril 2018).
- [17] Muriel HANTCHERLI. Influence d'éléments d'addition sur les transformations de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés. Thèse Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. France / Avril 2010.
- [18] Shete, N., & Deokar, S.U. (2017). A Review Paper on Rotary Friction Welding, International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIIME 2017), 5(6), 1557 – 1560.
- [19] Liu, H. J., Fujii, H., & Nogi, K. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AC4A cast aluminium alloy. Materials Science and Technology, 20(3), 399-402. (2004).
- [20] C. Genevois. Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 et 5000 et comportement mécanique résultant. PhD thesis, INPG, 2004. [21] Philibert, J., Vignes, A., Bréchet, Y., & Combrade, P. (2013). Métallurgie. Du minerai au matériau,
- [21] Philibert, J., Vignes, A., Bréchet, Y., & Combrade, P. (2013). Métallurgie. Du minerai au matériau, Technique et ingénierie / Mécanique et matériaux. Paris, Dunod, coll. 2ndéd.
- [22] Tutoriel ABAQUS.



# Annexes

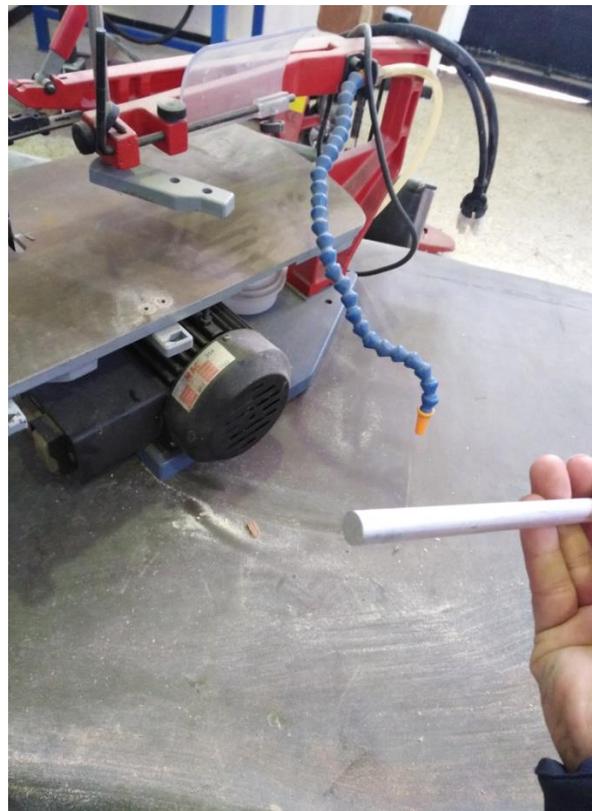
## Préparation des échantillons

### 1- Découpage et usinage :

Le découpage a été effectué au niveau de l'atelier 'préparation mécanique' au niveau du CRTI à l'aide d'une machine de découpage (Disque en Acier) .en utilisant la lubrification continue à froid pour éviter tout échauffement qui pourrait modifier les propriétés et caractéristiques du matériau.

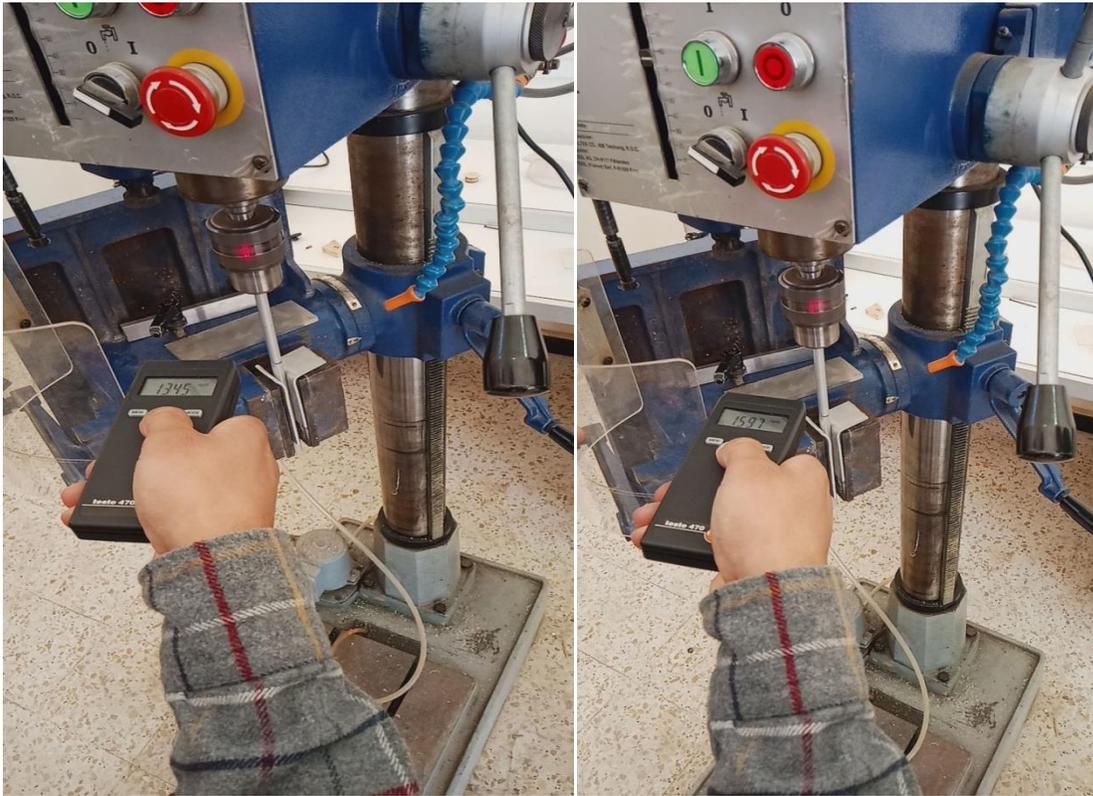


## 2-Preparation des surfaces :



En utilisant la lubrification continue a froid pour éviter tout échauffement qui pourrait modifier les propriétés et caractéristiques du matériau.

### 3-Reglage de vitesse de rotation avec le Tachymètre testo 470 .



Ce tachymètre combine la mesure optique et mécanique de la vitesse de rotation.

**4-Operation de soudage :**



**5-Type de fixation :** Dans notre cas la barre est encastré-libre.



**7-Analyse modale :** prendre des resultas.

