

الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : .....

Ref : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم: .....

المرجع: .....

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

**Doctorat en sciences en : Génie Mécanique**

**Option : Génie Mécanique**

# **Soudage des matériaux dissemblables**

Présentée par :

**Djamel Eddine Heddar**

Soutenue publiquement le 03/06/2021

**Devant le jury composé de :**

Dr. HAMDI Ines	MCA	Président	Université Mohamed Khider-Biskra
Pr. BOUMERZOUG Zakaria	Professeur	Rapporteur	Université Mohamed Khider-Biskra
Dr. RAOUACHE EL Hadj	MCA	Examineur	Université de Bordj Bou Areridj
Dr. HELAL Yazid	MCA	Examineur	Université de Ouargla

Année universitaire 2020-2021

## ***DEDICACES***

*A mes chers parents, ma femme, ma sœur et mes frères*

*A mes chères filles Amina et NourElyakin (mimi& nono)*

*A toute ma famille*

*A mes amis*

## Remerciements

*Merci à Dieu le tout puissant de m'avoir aidé à accomplir ce modeste travail.*

*Mes remerciements très particuliers s'adressent à mon directeur de thèse, monsieur **Boumerzoug Zakaria**, éminent professeur en transformation de phases, à l'université de Biskra, qui a assuré la direction de mon travail à travers ses orientations et son aide dans la réalisation de ce travail.*

*Je remercie les membres de jury qui ont accepté de juger ce modeste travail de thèse en l'occurrence :*

- Dr. Hamdi Ines, Maître de conférences à l'université de Biskra.*
- Dr. Raouache El-Hadj, Maître de conférences à l'université de Bordj.Bouaréridj.*

*-Dr. Helal Yazid, Maître de conférences à l'université de Ouargla.*

*Je remercie les membres du labo mécanique à l'université de Annaba, en particulier directeur Dr. Ziani slimen et le Mr. Hessainia Chaouki.*

*Je remercie tous les membres du labo mécanique à l'université de Bordj.Bouaréridj en particulier le Dr. Raouache El-Hadj et l'ingénieure de labo Mr Amer .*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

---

# Table des matières

Dédicaces	
Remerciements.	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre -I- Soudage par friction rotative	3
I.1. Introduction	3
I.2. Histoire et définition du soudage par friction	3
I.3.Types de soudage par friction	4
I.3.1. Soudage par friction linéaire	4
I.3.2.Soudage par friction-malaxage	5
I.3.3. Le soudage orbital	7
I.4. Soudage par friction rotative	7
I.4.1. Principe du soudage par friction rotative	9
I.4.2. Type des phases d'un cycle de soudage par friction rotation	9
I.4.2.1. Phase de friction	11
I.4.2.2. phase de forgeage	11
I.5. Paramètres du soudage par friction	11
I.5.1. Vitesse de rotation	12
I.5.2. La vitesse d'avance	12
I.5.3. Pression	12
I.5.4. Temps	13
I.6. Aspect métallurgique du joint soudé par friction rotation	13
I.7. Avantages et inconvénients du soudage par friction rotation	15
I.7.1. Avantages	15
I.7.2. Inconvénients	16
I.8. Application industrielles du soudage par friction rotative	16
I.8.1.Fabrication des pièces commerciales	16
I.8.2. Aérospatiale	17
I.8.3. Hydraulique	18
I.8.4. L'automobile	18
I.9 Assemblage des matériaux dissemblables	19
I.9.1. Domaine agricole	20
I.9.2. Les tiges de forage	21
Conclusion partielle	21

Bibliographie	22
Chapitre- II - Etat de l'art sur le soudage par friction rotative de cuivre et de l'acier	24
II.1. Introduction	24
II.2. Intérêt de soudage de cuivre avec l'acier	24
II.3. Soudage par friction rotation	25
II.4. Assemblage de matériaux en acier inoxydable et en cuivre avec (FW)	29
II.4.1. Variations de la dureté des pièces soudées	30
II.5. Principe de soudage par friction radiale de cuivre et Acier 35CrMnSi	31
II.6. Soudage par friction à entraînement continu Al/Fe et Joints Cu/Fe	33
II.7. Conclusion partielle	35
Bibliographie	36
Chapitre -III- Méthodes Expérimentales et Techniques d'Analyse	37
III.1. Introduction	37
III.2. Conditions expérimentales	37
III.2.1. Matériaux de base utilisée	37
III.2.2. Propriétés mécaniques	38
III.3. Procédé de Soudage	39
III.3.1. La machine utilisée	39
III.3.2. Système de fixation	40
III.3.2.1. Porte-outil typique	40
III.3.2.2. Mandrin et support mandrin	41
III.4. Mode opératoire	42
III.4.1. Paramètres du soudage	42
III.4.2. Expérimentation	44
III.4.3. Procédure et instruction de soudage	44
III.4.4. Mesures de température par caméra infrarouge	47
III.4.4.1. Procédure du mesurer de température par caméra infrarouge	47
III.5. Techniques de caractérisation microstructurale	48
III.5.1. Préparation métallographique des échantillons	48
III.5.2. Analyse chimique	49
III.5.3. Polissage	49
III.6. Techniques d'observation microscopiques	50
III.6.1 Observations au microscope optique	50
III.6.2. Observations au microscope électronique à balayage (MEB)	50
III.7. Caractérisation mécanique	52
III.7.1. Essais de traction	52
III.7.2. Mesures de dureté Vickers	53
Bibliographie	54

---

Chapitre -IV-	Résultats et discussions	55
IV.1. Introduction		55
IV.2. Paramètres de soudage		55
IV.2.1. Mesure les variations de la longueur des échantillons		56
IV.3. Etude thermique du joint soudé		57
IV.3.1. Mesure de température		57
IV.4. Observations microstructurales des joints soudés		60
IV.4.1. Microscopie optique des joints soudés		61
IV.4.2. Zones caractéristiques d'un joint de soudure par friction		61
IV.4.2.1. Zone affectée thermomécaniquement (ZATM)		61
IV.4.2.2. Zone affectée thermiquement (ZAT)		62
IV.4.2.3. Zone non affectée		62
IV.5. Etude de la zone affectée thermomécaniquement		62
IV.5.1. Vitesse de rotation 700 tr/min		63
IV.5.2. Vitesse de rotation 1000 tr/min		65
IV.5.3. Vitesse de rotation 1400 tr/min		66
IV.6. Microscopie électronique à balayage des joints soudés		69
IV.6.1. Vitesse de rotation 700 tr/min		70
IV.6.2. Vitesse de rotation 1000 tr/min		71
IV.6.3. Vitesse de rotation 1400 tr/min		72
IV.7. MEB et EDS		73
IV.7.1. Vitesse de rotation 700 tr/min		73
IV.7.2. Vitesse de rotation 1000 tr/min		76
IV.7.3. Vitesse de rotation 1400 tr/min		79
IV.8. Mesures de dureté des joints soudés		82
IV.8.1. Vitesse de rotation 710 tr/min		82
IV.8.2. Vitesse de rotation 1000 tr/min		84
IV.8.3. Vitesse de rotation 1400 tr/min		85
IV.9. Essais de traction des joints soudés		86
IV.9.1. Observation macroscopiques après rupture des éprouvettes		87
IV.9.2. Grandeurs mécaniques déduites des essais de traction		88
IV.9.2.1. Effort maximal F (N)		88
IV.9.2.2. Résistance maximale Rm (N/mm <sup>2</sup> )		89
IV.9.2.3. La limite élastique Re (N/mm <sup>2</sup> )		90

IV.9.2.4. Allongement A%	91
Bibliographie	92
Conclusion générale	93
Résumé	94

## Liste des figures

	Chapitre -I- Soudage par friction rotative	
Figure I.1	Soudage par friction linéaire	5
Figure I.2	Soudage par friction rotative. a- entraînement direct ; b- entraînement indirect	6
Figure I. 3	Soudage par friction malaxage	7
Figure I.4	Soudage orbital	8
Figure I.5	Etapas d'un cycle de soudage par friction rotative	10
Figure I.6	Variations des paramètres opératoires en fonction du temps lors d'une opération de soudage par friction	10
Figure I. 7	Effets de la pression et la vitesse sur la morphologie de la ZAT	13
Figure I.8	Illustration schématique des différentes régions de la ZAT et ZATM d'une soudure par friction. 1- Zone de contact, 2- Zone totalement plastifiée, 3- Zone partiellement plastifiée, 4- Zone indéformé	14
Figure I.9	Quelques pièces commerciales soudées par RFW	17
Figure I.10	Une pièce soudée par RFW utilisée dans les satellites	17
Figure I .11	Des pièces soudées par RFW utilisées dans le domaine d'hydraulique	18
Figure I.12	Une pièce d'automobile soudée par RFW	19
Figure I.13	Des pièces en matériaux dissemblables soudées par RFW	20
Figure I.14	Des pièces soudées par(RFW) utilisées dans le domaine agriculture	20
Figure I. 15	Fixation d'une bride à une valve hydraulique	21
	Chapitre- II - Etat de l'art sur le soudage par friction rotative de cuivre et de l'acier	
Figure II. 1	Soudage par friction (a) schéma d'une machine de soudage par friction, (b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydrauliques.	25
Figure II. 2	Joint dissimilaire A5083 / S10C obtenu par le soudage par friction : composés intermétalliques à l'intérieur de la couche IMC d'après l'analyse EDS de la soudure	26
Figure II.3	Différentes formes de couches intermétalliques dans une soudure : (a) taches intermétalliques, (b) poussière de intermétallique, (c) couche intermétallique.	27

Figure II.4	Joint obtenu par friction rotative	27
Figure II.5	Eprouvette après l'essai de traction du joint soudé Acier inoxydable/Cuivre	28
Figure II.6	Profil de microdureté Vickers le long du joint soudé	28
Figure II.7	Microstructures du joint soudé Acier inoxydable/Cuivre	29
Figure II.8	Joint obtenu par friction rotative	30
Figure II.9	Répartition de la dureté sur la distance horizontale des joints	30
Figure II.10	Distribution de la dureté sur la distance verticale pour différentes distances horizontales des joints.	31
Figure II.11	Soudage par friction radiale inertielle (IRFW).	31
Figure II.12	Microstructures du joint soudé (400x), (a) H96 + 35CrMnSi, (b) B5 + 35CrMnSi, (c) T3+35CrMnSi	32
Figure II.13	Microstructures 35CrMnSi Acier (530x) joints HAZ	32
Figure II.14	profile de micro dureté.	32
Figure II.15	Schéma de principe du soudage par friction à entraînement continu	33
Figure II.16	Apparence des joints (a) Al/Fe et (b) Cu/Fe à différentes pressions de soudage	34
Figure II.17	Analyse de la phase DRX et morphologies des surfaces fracturées des joints Cu/Fe.	34
Chapitre III. Méthodes Expérimentales et Techniques d'Analyse		
Figure III. 1	Barres cylindriques des deux métaux base en cuivre et en acier	37
Figure III.2	(a) Courbe Contrainte – Déformation de l'acier A60	38
Figure III.2	(b) Courbe Contrainte – Déformation de cuivre	38
Figure III.3	Machine de fraisage de marque PMO UF 1.5	40
Figure III.4	Porte outil typique	40
Figure III.5	(a) Mandrin a trois mors, (b) Support mandrin	41
Figure III.6	Système de soudure par friction rotative	41
Figure III.7	Schématisation des différentes étapes du procédé de soudage par friction rotative	43
Figure III.8	Démarrage du cycle de soudage	45
Figure III.9	Phase d'accostage F1	45
Figure III.10	Phase d'échauffement	46
Figure III.11	Phase de forgeage	46

Figure III.12	Fin de la phase de forgeage	46
Figure III.13	Pièces après soudage	46
Figure III.14	Capteur de température à distance de marque Infrared Video Thermometer (IRVT) device (FI 638TI)	48
Figure III.15	Coupes longitudinales des échantillons soudés	48
Figure III.16	Machine de polissage	49
Figure III.17	Microscope métallographique de type Nikon ECLIPSE	50
Figure III.18	Microscope électronique à balayage de marque PHILIPS / FEI QUANTA 250	51
Figure III.19	Chambre du microscope électronique à balayage et la disposition de plusieurs échantillons à analyser	52
Figure III.20	Machine universelle de traction de marque ZWICK 1476 100KN	52
Figure III. 21	Microdurometre Vickers de type : Matsuzawa MXT 70	53
	Chapitre IV. Résultats et discussions	
Figure IV.1	Effets de la vitesse de rotation sur la variation de la longueur de L'échantillon	57
Figure IV.2	Variation de la température au centre du joint soudé en fonction du temps de soudage et de la vitesse de rotation lors du soudage pour les trois vitesses d'avance $V_a$ .	60
Figure IV.3	Photos illustrant trois sections prélevées dans des soudures par friction réalisées sous différentes conditions	61
Figure IV.4	Micrographie optique montrant le changement de la microstructure à travers une soudure par friction d'un acier A 60 Attaque Nital 3 % et cuivre Cu Attaque H N O <sub>3</sub> , 1- ZATM, 2- ZAT, 3- Métal de base, g 100 X	62
Figure IV.5	Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 700tr/min	64
Figure IV.6	Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1000 tr/min	66
Figure IV.7	Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1400tr/min	68
Figure IV.8	Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1400 tr/min et vitesse d'avance 63mm/min	69

Figure IV.9. (a,b,c)	Micrographie au MEB du centre de la zone affectée thermomécaniquement (ZATM) d'un joint de soudure par friction rotative (a)E3, (b) E6, (c) E9	72
Figure IV.10. (a, b, c)	Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 700tr/min	75
Figure IV.11. (a, b, c)	Analyse chimique par EDS du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1000 tr/min	78
Figure IV.12. (a, b ,c)	MEB et analyse par EDS du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1400tr/min	81
Figure IV.13	Profils de microdureté Vickers le long du joint Cuivre/Acier soudé sous une vitesse de rotation 710 tr/min.	83
Figure IV.14	Profils de microdureté Vickers le long du joint Cuivre/Acier soudé sous une vitesse de rotation 1000 tr/min.	85
Figure IV.15	Profils de microdureté Vickers le long du joint Cuivre/Acier soudé sous une vitesse de rotation 1400 tr/min	86
Figure III.16	Observation macroscopiques après rupture des éprouvettes	87
Figure IV.17	Variation de l'effort maximal F du joint Cuivre/Acier soudé en fonction de la vitesse de rotation	88
Figure IV.18	Variation de la résistance maximale Rm du joint Cuivre/Acier soudé en fonction de la vitesse de rotation	89
Figure IV.19	Variation de la limite élastique Re en fonction de la vitesse de rotation lors du soudage du joint Cuivre/Acier	90
Figure IV.20	Variation de l'allongement A % en fonction de la vitesse de rotation lors du soudage du joint Cuivre/Acier	91



## **INTRODUCTION GENERALE**

L'assemblage des matériaux dissemblables est l'un des besoins les plus essentiels des industries. Le soudage par friction est un procédé à l'état solide qui permet d'assembler des matériaux, en particulier des matériaux dissemblables. Le soudage par friction rotative (RFW) est la méthode la plus couramment utilisée dans le soudage par friction, où la chaleur de soudage est générée par le frottement entre les surfaces d'une pièce en rotation et d'une autre fixe [1]. Le RFW est la méthode appropriée pour assembler des métaux similaires et dissimilaires, avec les avantages suivants : pas de fusion, temps de production court et faible consommation d'énergie [2]. Les principaux paramètres du soudage par friction rotative sont la vitesse de rotation, le temps de soudage et la pression [1, 3]. Les principaux avantages du soudage par friction sont l'économie de matériaux, le temps de production réduit et la possibilité de souder des métaux ou des alliages différents [4].

De nombreux travaux de recherche ont été récemment menés sur le soudage par friction de matériaux dissemblables, comme le soudage par friction d'alliages ferreux et non ferreux. Par exemple, dans leurs études, Sahin et ses collaborateurs [5] ont étudié le soudage de l'acier et le cuivre en utilisant le procédé de soudage par friction.

D'après nos recherches bibliographiques, les travaux de recherche consacrés à l'étude de l'assemblage de l'acier et du cuivre par RFW est très limité, c'est pourquoi nous avons opté pour ce sujet de recherche. Dans ce travail de thèse, des soudures par friction rotative ont été effectuées sur des barres d'acier en cuivre industriel avec un acier A60. La vitesse de rotation et la vitesse de déplacement ont été modifiées pour avoir le meilleur joint soudé. Les techniques de caractérisation utilisées sont l'essai de traction, des mesures de dureté et des observations microscopiques ont été effectuées en utilisant le microscope optique et le microscope électronique à balayage. Ce dernier est équipé par (EDS)

La thèse est composée de quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les différents types de procédés de soudage en fusion et à l'état solide et qui sont utilisés pour le soudage dissimilaire. Un aperçu général a été aussi introduit sur le principe général du soudage par friction rotative et ses différents domaines d'application industrielle.

- Le deuxième chapitre est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherche publiés liés à notre thème de recherche.
- Le troisième chapitre : décrit le mode opératoire et les matériaux utilisés. Les techniques de caractérisation utilisées sont la microscopie optique pour voir l'évolution de la microstructure du joint, le MEB pour l'observation de l'intermétallique, l'EDS pour déterminer la composition chimique des phases à l'interface des barres soudées, la DRX pour la caractérisation des phases, la mesure de micro dureté Vickers pour distinguer la dureté de chaque zone du joint soudé, et enfin des essais mécaniques de traction pour évaluer la rigidité du joint.
- Le quatrième chapitre rassemble les résultats expérimentaux obtenus, les discussions de ces résultats et leur interprétation.

Enfin une conclusion générale accompagnée de quelques perspectives.

## ***Chapitre I. Soudage par friction rotative cuivre / acier***

### **I-1.Introduction**

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toute les branches d'industrie, 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 réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler soit par chauffage , soit par intervention par pression , soit par l'un ou l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle de matériaux de base [1].

Parmi les procédés de soudage on trouve le soudage par friction ou par frottement. Cette technique 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 [2].

### **I.2.Histoire et définition du soudage par friction**

Au fil des années, de nombreuses tentatives ont été faites pour décrire les phénomènes de frottement. Il était un problème pour l'humanité à travers les âges.

Le rythme toujours croissant des progrès technologiques reste un rempart pour l'économie, qui repose sur des processus innovants qui stimulent la croissance, en particulier applicable à une série d'industries. L'un de ces procédés innovants, qui continue à rendre son Le soudage par friction est une marque qui se fait sentir dans divers secteurs. Le soudage par friction est une méthode éprouvée et rentable d'assemblage de matériaux similaires ou très différents qui s'est avérée très populaire en Europe et en Asie, mais il est largement méconnu et largement sous-utilisé aux États-Unis. C'est le cas malgré le fait qu'il s'agisse d'une méthode privilégiée dans l'avion et l'industrie automobile, et ironiquement, le premier brevet pour ce procédé a été introduit dans l'États-Unis [3].

Le soudage par friction est un type de soudage par forgeage, c'est-à-dire que le soudage est effectué par le l'application de la pression. Le frottement génère de la chaleur, si deux

surfaces sont frottées ensemble, suffisamment la chaleur peut être générée et la température peut être augmentée jusqu'au niveau où les pièces sont soumises à la friction peuvent être fusionnés.

Dans le soudage par friction classique, la rotation relative entre deux pièces est les travaux sont effectués en pressant les pièces ensemble. En général, une fois qu'une chaleur suffisante est construite à l'interface entre les pièces, la rotation relative est arrêtée et les pièces sont poussées ensemble sous une force de forgeage qui peut être égale ou supérieure à celle de l'original de la force de pression.

Le soudage par friction (FW) est un groupe de procédés de soudage à l'état solide utilisant la chaleur générée par le frottement mécanique entre une pièce en mouvement, avec l'ajout d'une force de refoulement pour déplacer plastiquement la matière.

### **I.3. Types de soudage par friction**

Selon la manière de produire le frottement, il existe différentes variantes du procédé de soudage par friction, à savoir le procédé de soudage par friction linéaire (Figure I.1), le soudage par friction rotative (Figure I.2) et le procédé de soudage par friction malaxage (Figure I.3).

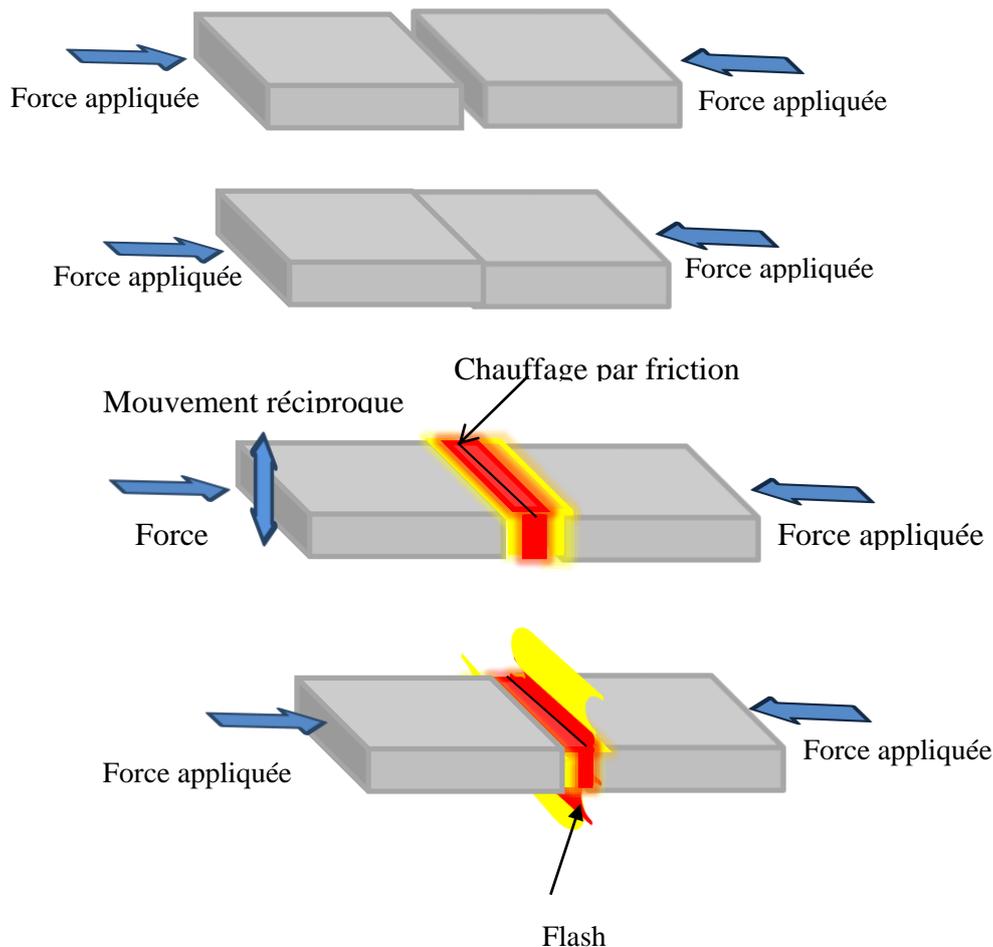
#### **I.3.1.Soudage par friction linéaire**

Le soudage par friction linéaire (LFW) est considéré comme une technologie clé pour l'industrie de l'aérospatiale, car elle permet d'assembler des matériaux difficiles à coller, peut être utilisée comme réparation et de construire les structures complexes nécessaires aux turbines à gaz actuelles. Il s'agit essentiellement un procédé de fusion sans fusion produisant des soudures de haute intégrité avec peu de surface préalable préparation requise.

La soudure par friction linéaire, (ainsi nommée parce que le mouvement relatif est linéaire à travers la plutôt que rotatif), est déjà utilisé pour relier les pales aux disques dans l'industrie de l'aéromoteur. Des machines de soudage par friction linéaire moins coûteuses sont actuellement mises au point pour les applications automobiles, telles que la fabrication de disques de frein, de jantes de roue et de pièces de moteur. Lorsque les pièces à souder sont mises en contact intime, un mouvement entièrement inversé est imposé sur une partie du système. Cela génère une chaleur de friction dans la zone immédiate de la soudure et ramollir ainsi un volume fini de matière. Au fur et à mesure de la soudure, une partie de cette la couche visco-plastique est extrudée à la périphérie de l'interface de soudure, dans des feuilles de métal ondulées connu sous le nom de flash. Cela devrait garantir l'expulsion de tout contaminant

interfacial. Le site combinaison de temps d'assemblage rapide de l'ordre de quelques secondes et de l'apport direct de chaleur à l'interface de soudure, donne lieu à des zones relativement petites affectées par la chaleur. Ceci, par une judicieuse la sélection de la géométrie des composants, ce qui limite également les distorsions induites par le processus.

Cette méthode est rapide et généralement appliquée sur pièces avec surface uniforme et suffisante largeur (voir figure1) [4].



**FigureI.1** : Soudage par friction linéaire [4].

### I.3.2.Soudage par friction-malaxage

Le soudage par friction-malaxage produit également une région plastifiée de la matière, mais dans un de manière différente. Un outil rotatif non consommable est poussé dans les matériaux à souder puis la broche centrale, ou sonde, suivie de l'épaule, est mise en contact avec les deux parties à joindre (figure I.3). La rotation de l'outil chauffe et plastifie les matériaux il est en contact avec et, à mesure que l'outil se déplace le long de la ligne de jonction, le

matériau de l'avant de l'outil est balayé autour de cet anneau plastifié à l'arrière, éliminant ainsi l'interface. Le soudage par friction-malaxage (FSW) est une nouvelle technique de soudage inventée par The Welding Institute (TWI) en 1991. La FSW est en fait un processus d'assemblage à l'état solide qui est une combinaison de l'extrusion et le forgeage et n'est pas un véritable procédé de soudage. Étant donné que le processus se déroule à une température inférieure au point de fusion du matériau de la pièce, la FSW présente plusieurs avantages sur la soudure par fusion. Certains des avantages du procédé sont présentés dans la liste suivante :

1. Le soudage par fusion est efficace sur le plan énergétique.
2. Les déchets solides nécessitent un minimum de consommables.
3. Le soudage par fusion produit des microstructures souhaitables dans les zones de soudure et les zones affectées par la chaleur
4. sont "respectueux de l'environnement" (pas de fumées, de bruit ou d'étincelles)
5. peut assembler avec succès des matériaux qui sont "non soudables" par des méthodes de soudage par fusion.
6. Les soudures par fusion produisent moins de distorsion que les techniques de soudage par fusion.

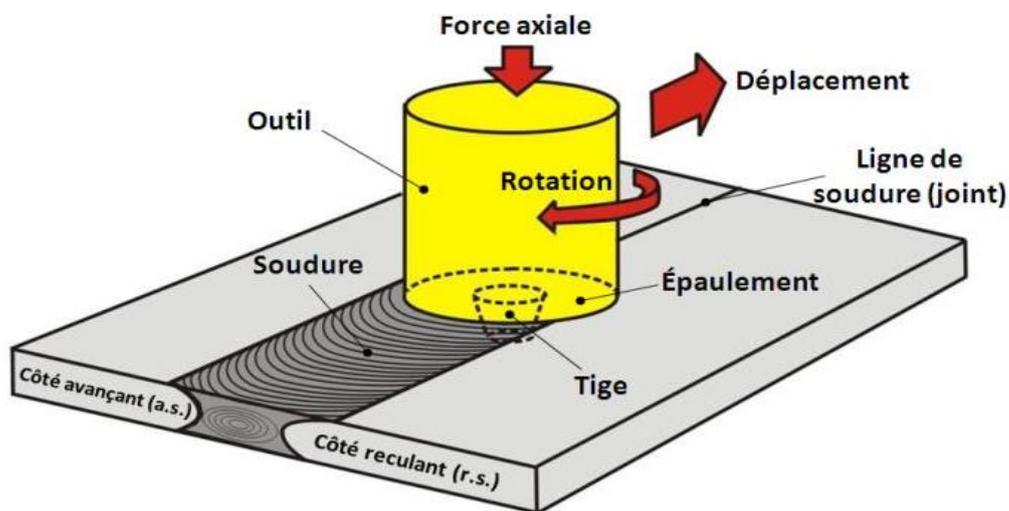


Figure I. 3 : Soudage par friction malaxage. [5]

### I.3.3. Le soudage orbital

Le centre du composant se déplace par rapport à l'autre composant autour d'un deux dimensions courbe pour fournir l'action de frottement. (Figure I.4)

- Les deux pièces pivotent autour d'axes longitudinaux dans la même direction avec la même vitesse angulaire.
- Les deux axes longitudinaux sont parallèles à un petit décalage de distance.
- Lorsque le mouvement des composants s'est arrêté et avant l'application de la pression de frottement, Les pièces sont correctement alignées pour former une soudure.
- Il est utilisé pour la fabrication et la réparation.

Ses applications incluent le soudage bout à bout et les composants non circulaires, tels comme des pales de turbine.

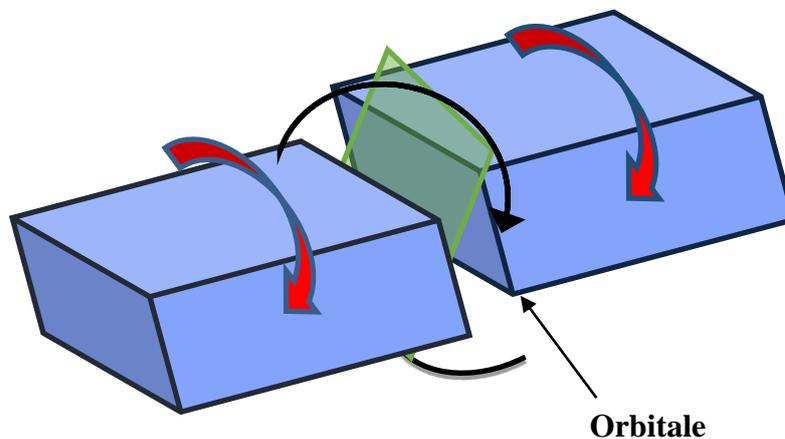


Figure I.4 : Soudage orbital. [4]

### I.4. Soudage par friction rotation

Ce type de soudage est utilisé pour les pièces de révolution. Dans ce processus, une pièce est animée d'un mouvement de rotation autour de son axe tandis que l'autre est maintenue immobile sous un effort axial de compression. Lors du soudage par friction rotative, l'énergie de rotation pendant la phase de friction peut être générée et transférée à la pièce tournante selon deux manières. Par l'utilisation d'un moteur tournant à vitesse constante (soudage par friction pilotée) ou par l'utilisation de l'énergie cinétique stockée dans un volant rotatif (soudage par friction inertielle). [4]

Soudage par friction rotative, dans lequel un composant est tourné contre l'autre, est le procédé le plus couramment utilisé, et de nombreux essieux et sous-essieux de véhicules en acier au carbone sont assemblés de cette manière. Le procédé est également utilisé pour fabriquer des tiges de suspension, les colonnes de direction, les fourches et les arbres de transmission des boîtes de vitesses, ainsi que les soupapes de moteur, dans lesquelles la capacité d'assembler des matériaux différents signifie que la tige et la tête de la vanne peuvent être fabriquées des matériaux adaptés à leurs différents cycles d'utilisation en service.

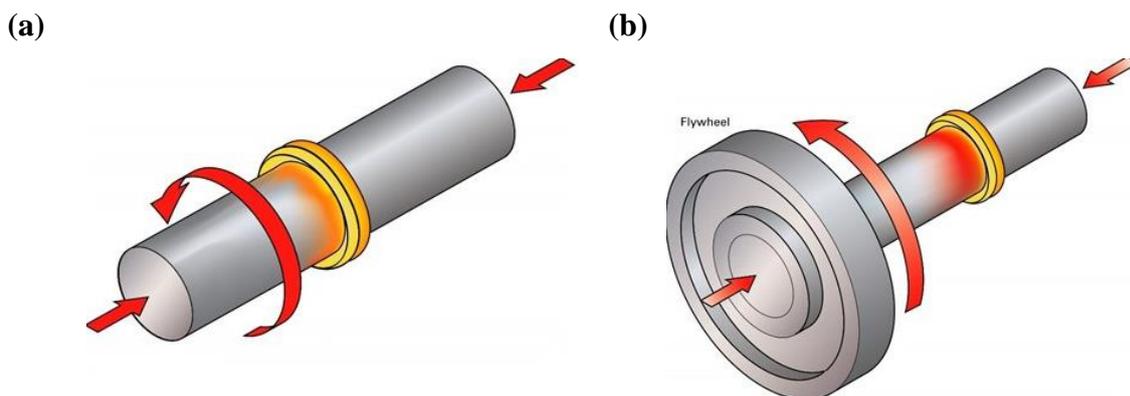
Il y a deux mécanismes principaux pour fournir l'énergie à l'interface de soudure :

#### a. L'entraînement direct

Dans ce cas la pièce rotative est entraînée en continu par le moteur de broche de l'équipement (voir figure 1.2-a)

#### b. L'entraînement indirect

Cette fois ci, la partie tournante est connectée à un volant qui est déconnecté du moteur d'entraînement une fois qu'une vitesse de rotation désirée est atteinte. Les pièces s'engagent alors et le volant fournit l'énergie à l'interface. Pendant cette approche, la vitesse de rotation diminue progressivement pour s'arrêter (voir figure 1.2-b)



**Figure I.2 :** Soudage par friction rotative. a- entraînement direct ; b- entraînement indirect [4].

### **I.4.1. Principe du soudage par friction rotative**

Un grand nombre de pièces fabriqués à partir de différents matériaux ont traditionnellement nécessité certaines opérations d'assemblage. Habituellement, certaines méthodes de soudage par fusion sont utilisées pour souder des aciers à faible teneur en carbone. Cependant, le soudage des aciers à haute teneur en carbone et des superalliages est plus difficile que de souder des aciers à faible ou moyen carbone en raison de la teneur élevée en carbone qui affaiblit la soudabilité du matériau. Bien que les méthodes de soudage par fusion conventionnelles ne soient pas facilement compatibles avec les dernières nuances de superalliages à haute résistance, des techniques de soudage par friction sont en cours de développement dans ces applications. Le soudage par friction rotative est un processus qui produit une soudure sous l'effet d'une force de compression, mettant en contact deux pièces en rotation l'une par rapport à l'autre afin de produire de la chaleur et de déformer plastiquement le matériau à l'interface de contact [6].

Le joint de soudure peut être obtenu sans atteindre le point de fusion du matériau ; ce qui réduit considérablement les problèmes de fissuration et la déformation grossière des soudures lors de la solidification. En outre, le soudage par friction présente des avantages supplémentaires par rapport aux techniques de soudage par fusion [7].

### **I.4.2 Type des phases d'un cycle de soudage par friction rotative**

La réalisation d'un cycle de soudage par friction rotative consiste en première étape à mettre en rotation la pièce tournante, l'accostage et la mise en contact des deux pièces à souder. Une force de compression axiale est ensuite appliquée pour que les deux pièces frottent l'une contre l'autre. Durant cette étape, la chaleur nécessaire au soudage est générée, ce qui provoque une déformation plastique du matériau à l'interface de contact. Après avoir atteint une durée ou un raccourcissement axial prédéterminé, la pièce en rotation est arrêtée et la force axiale est augmentée en même temps jusqu'à ce que la soudure soit consolidée et refroidie. Les étapes de base du soudage par friction rotative sont illustrées dans la Figure I.5. Les principaux paramètres opératoires du procédé de soudage par friction rotative sont donc la vitesse de rotation, la pression axiale et le temps de soudage. Ces paramètres déterminent la quantité de chaleur générée à l'interface de soudage et influencent la qualité du joint de soudure obtenu.

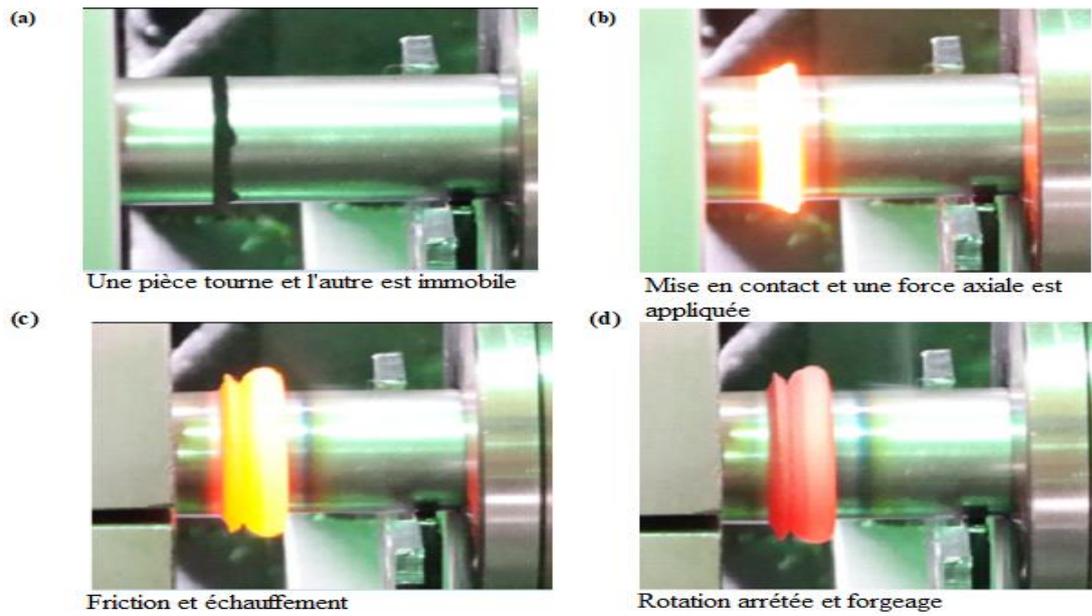


Figure I.5 : Etapes d'un cycle de soudage par friction rotative. [8]

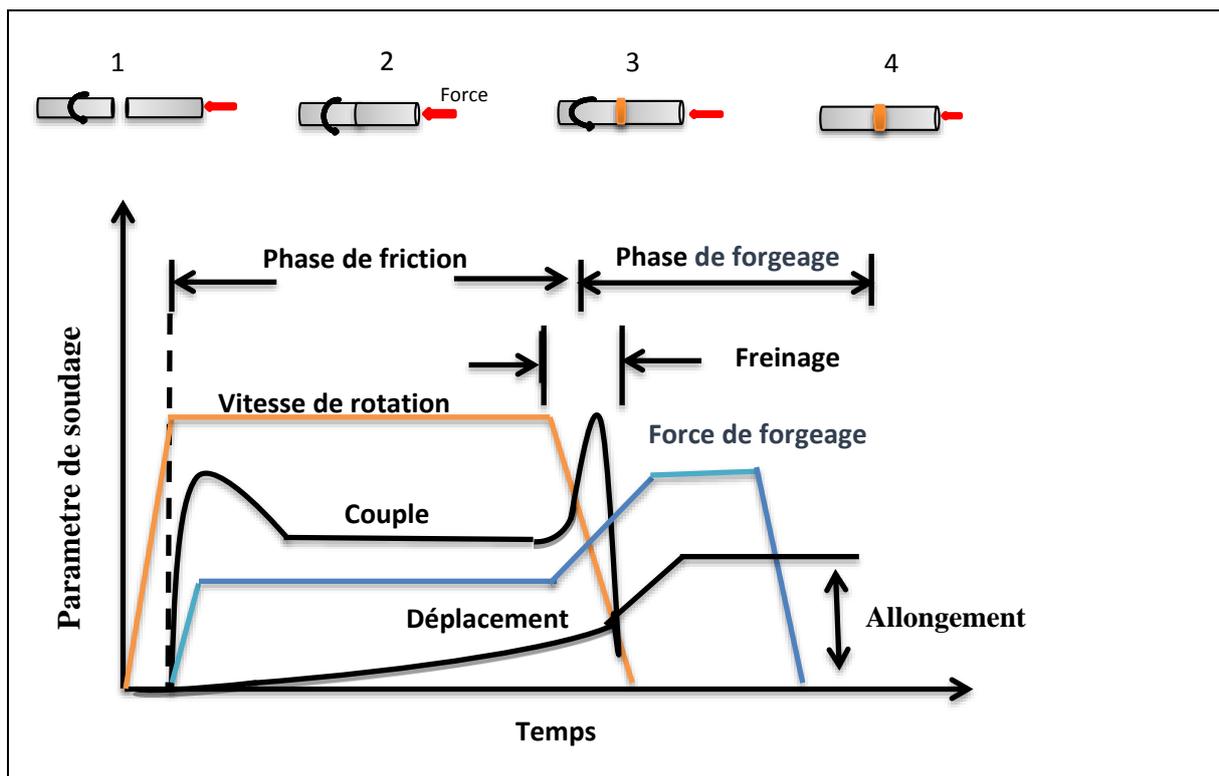


Figure I.6 : Variations des paramètres opératoires en fonction du temps lors d'une opération de soudage par friction. [10]

En général, un cycle de soudage par friction peut être divisé en deux phases. Phase de friction (phase d'échauffement) où la chaleur de soudage est générée afin de plastifier le matériau et former le bourrelet à l'interface. Phase de forgeage où la rotation est arrêtée et la pression est augmentée. Cette phase correspond à la consolidation et refroidissement de la soudure. Les relations entre les variables du processus sont illustrées à la figure I.6 qui représente la vitesse de rotation et la pression axiale en fonction du temps pour une soudure typique. Le temps nécessaire de freinage (arrêt de la broche tournante) est également un paramètre important, car il affecte la température de soudure et le timing de la force de forgeage [9].

#### **I.4.2.1 Phase de friction**

Durant la phase de friction, les surfaces en contact se frottent l'une contre l'autre sous l'action d'un effort axial de compression. Ceci permet la génération de la chaleur et une forte adhésion se produit à la zone de contact. Après un certain moment, un cisaillement se produit et le métal est transféré d'une surface à l'autre. À mesure que le frottement continue, la température à l'interface et le couple augmentent et la quantité de la matière transférée croît. Pendant cette période, le couple augmente et diminue jusqu'à une valeur minimale qui reste constante. Lorsque le métal est chauffé et plastifié, il est transféré - sous l'effet de la force axiale - à partir de l'interface vers les bords extérieurs. Le raccourcissement axial se poursuit à augmenter [11].

#### **I.4.2.2 phase de forgeage**

Lorsque la vitesse de rotation tend à diminuer (à la fin de la phase d'échauffement) et la pression est augmentée (au début de la phase de forgeage), un deuxième pic de couple se produit lorsque la liaison métallique se produit à l'interface et se refroidit. Le couple est ensuite tend à diminuer lorsque la vitesse de rotation s'annule. Pour les métaux dissemblables, plusieurs facteurs peuvent influencer le mécanisme de liaison ce qui le rend plus complexe et très difficile de prédire l'aptitude à la soudabilité des métaux différents. Parmi ces facteurs, on cite notamment les propriétés physiques et mécaniques, la structure cristalline, la solubilité mutuelle et les composés intermétallique [12].

### **I.5 Paramètres du soudage par friction**

Les paramètres importants qui affectent la qualité des soudures obtenues par friction rotative sont la vitesse de rotation, la pression axiale et le temps nécessaire pour réaliser un cycle de soudage.

**I.5.1 Vitesse de rotation :**

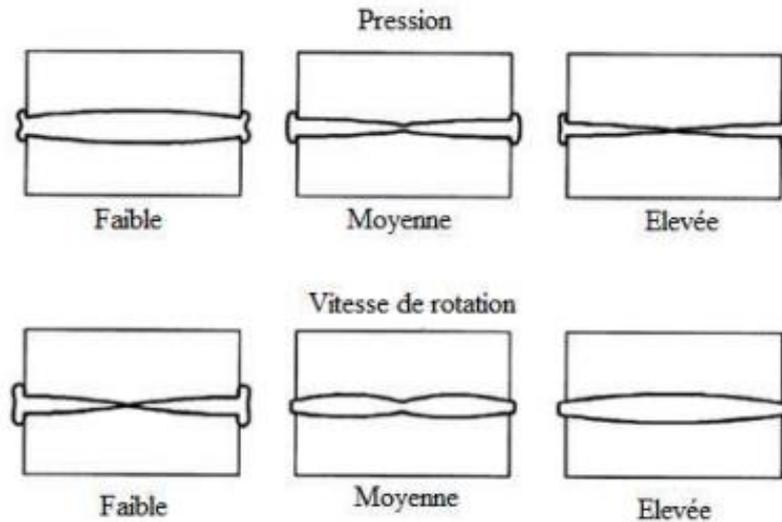
La vitesse de rotation est liée à la nature du matériau à souder et au diamètre de la surface à souder à l'interface. Ce paramètre a des effets différents sur les propriétés mécaniques des joints de soudure par friction. Une grande vitesse de rotation entraîne la génération d'une quantité importante de chaleur à l'interface, ce qui entraîne par conséquent, un ramollissement du matériau et une augmentation de la formation intermétallique. Afin de minimiser les effets néfastes et produire des joints de bonne qualité, les vitesses de rotation utilisées doivent être appropriées, Car, la variation des vitesses de rotation produit des effets différents sur la qualité du joint [13].

**I.5.2 La vitesse d'avance :**

La vitesse d'avance est la vitesse de déplacement de la pièce fixe, la combinaison deux vitesses assurées la soudabilité de matériaux. De même pour la génération de la quantité de chaleur entrante. Il est dépendent de la nature de l'alliage à assembler et des dimensions des pièces. Mishra et al. [14] ont rapporté que la vitesse d'avance et la vitesse de rotation de l'outil sont des paramètres très importants, qui influencent sur la qualité des joints soudés par friction rotative FW. L'augmentation de la vitesse de rotation fait croître le coefficient de frottement entre l'outil et matière soudée, donc augmentation de la quantité de chaleur générée. La diminution de la vitesse de rotation réduit le coefficient de frottement, diminue la quantité de chaleur générée et la quantité du métal remué [15]. Watanabe et al. [16] ont conclu qu'une vitesse de rotation optimale mène à une microstructure plus fine et une dureté plus élevée.

**I.5.3 Pression :**

La pression axiale choisie dépend des métaux assemblés et de la géométrie du joint. Cette pression a un effet sur la température dans la zone de soudure, la puissance d'entraînement requise et le taux de raccourcissement axial (volume du bourrelet écoulé). L'effet combiné sur la forme et la largeur de la soudure (Figure I.7), nécessite que le choix de la pression axiale et la vitesse de rotation doit se situer dans une plage appropriée pour chaque matériau à souder et ne doit pas être d'une manière indépendante [17].



**Figure I.7** Effets de la pression et la vitesse sur la morphologie de la ZAT. [17]

#### I.5.4 Temps :

Le temps caractérise la rapidité et la productivité du processus de soudage. Un temps d'échauffement très court peut entraîner un chauffage inadéquat et peut créer des zones non soudées à l'interface, ce qui produit des soudures faibles. Par contre, un temps de chauffage très long limite la productivité et entraîne un gaspillage de la matière (taux de raccourcissement important). Le contrôle du temps de chauffage peut se faire de deux manières. La première consiste à arrêter la rotation à la fin d'une durée prédéterminée à l'aide d'un système de chronométrage approprié. La deuxième méthode qui est configurée pour consommer une longueur suffisante pour assurer un chauffage adéquat, consiste à arrêter la rotation après un raccourcissement axial prédéterminé [18]. En résumé, pour un raccourcissement axial donné lors du soudage, le temps de chauffage sera gouverné par la vitesse et la pression de chauffage. Donc, le temps de chauffage décroît avec l'augmentation de la pression de chauffage [19].

#### I.6. Aspect métallurgique du joint soudé par friction rotative

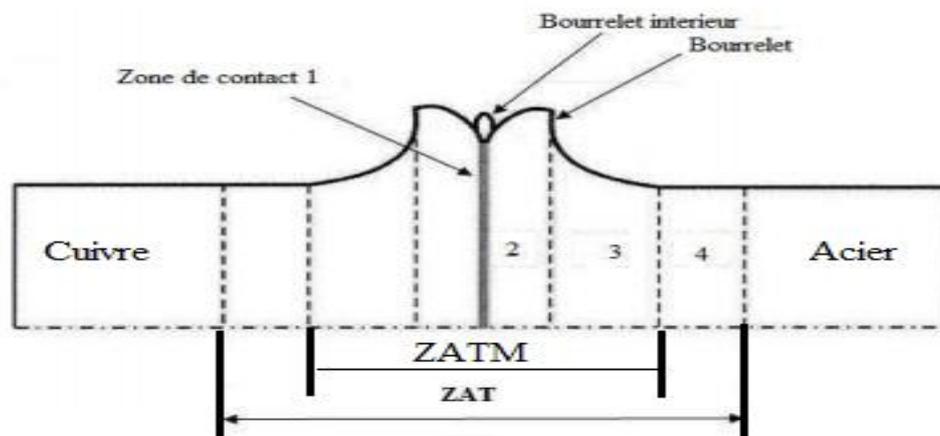
Il est connu que les joints soudés par un procédé de soudage conventionnel se caractérisent par la présence de trois zones différentes, soit la zone de fusion (zone frottée), la zone thermiquement affectée (ZAT) et le métal de base. Cependant, pour les joints obtenus par friction rotative comporte une zone en plus qui est la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) et une zone de malaxage, comme il est montré dans la figure I.8. Chacune de ces zones

possède des caractéristiques spécifiques qui seront exposées brièvement ci-dessous et explicitées dans les sous-sections suivantes.

La première zone, qui se trouve au centre du joint soudé, appelée le noyau de soudure, est la partie qui a subi la déformation la plus sévère. Sous l'effet combiné de l'écoulement du métal et du cycle thermique, cette zone a subi une recristallisation complète. La taille moyenne de grains dans cette zone est plus petite que dans le reste du joint. Dans cette zone, la température est assez élevée pour causer une mise en solution des précipités. [20].

La ZATM est la zone adjacente au noyau. Dans cette zone, le métal subit une déformation plastique importante. La combinaison déformation-température n'est cependant pas assez élevée pour déclencher les mécanismes de recristallisation dynamique. Cependant, la partie proche du noyau subit une recristallisation partielle.

La ZAT est la zone comprise entre le ZATM et le métal de base. La structure des grains reste pratiquement la même que celle du métal de base, mais il y a une augmentation de la taille des précipités métastables [21].



**Figure I.8** Illustration schématique des différentes régions de la ZAT et ZATM d'une soudure par friction. 1- Zone de contact, 2- Zone totalement plastifiée, 3- Zone partiellement plastifiée, 4- Zone indéformé. [20]

\* Cu et Acier : métal de base non affecté par la soudure ;

\* 1 et 2 : noyau de soudure proprement dit. Cette partie est relative au métal ayant subi la friction et le brassage. Dans certains cas, on distingue en outre la partie supérieure du cordon affectée par le frottement de la face active. [22]

\* 3 : zone affectée thermo mécaniquement (ZATM). Le métal a subi une déformation plastique et est également affecté thermiquement

\* 4 : zone affectée thermiquement (ZAT). Dans cette zone, le métal a subi une élévation de température pouvant avoir affecté la microstructure et (ou) les propriétés mécaniques. Il n'y a pas, par contre, de déformation.

## **I.7. Avantages et inconvénients du soudage par friction rotative**

### **I.7.1. Avantages**

Le soudage par friction est économique car il permet d'assembler différents matériaux, dont l'un peut être peu coûteux et son coût de contrôle de la qualité est minime avec une garantie de soudures de haute qualité. De plus, le cycle de soudure est relativement court, ce qui rend la productivité très intéressante. Le procédé de soudage par friction est adapté à la production de masse.

Le procédé de soudage par friction est adapté aux joints non homogènes impliquant des matériaux ayant des propriétés chimiques, mécaniques et thermiques très différentes. Le procédé est adapté à l'automatisation et peut être adopté pour une utilisation robotisée. Autres avantages comme suit : [23]

- Assemblages de haute qualité, avec une bonne structure métallurgique, car le matériau n'est pas porté à fusion.
- La soudure reste à l'état solide, évitant de nombreux défauts associés à la fusion et à la solidification lors du soudage par fusion, tels que les pores et les fissures de solidification. La distorsion du composant soudé est également réduite.
- 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 (économie 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 l'aluminium ou le cuivre sur l'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.

### **I.7.2. Inconvénients**

L'inconvénient du soudage par friction est que toutes les configurations ne sont pas possibles, qu'un de puissance suffisante est nécessaire et que, pour de courtes durées, le processus peut ne pas être économique.

Outre le coût de l'équipement, qui doit être adapté aux joints prévus, le processus de soudage par friction a des coûts d'outillage et de mise en place qui doivent être pris en compte lors du calcul des coûts par soudure. Des exigences de concentrations strictes, si nécessaire, peuvent être difficiles à rencontrer. Il est également possible de demander des opérations de finition dont le montant total est égal au coût total. [3]

## **I.8. Application industrielles du soudage par friction rotative**

Il peut être utilisé pour diverses applications :

### **I.8.1 Fabrication des pièces commerciales**

Plusieurs pièces commerciales sont construites par (RFW) en raison du fait que la soudure est accomplie rapidement et 100% forte. Le soudage par friction rotative fournit une pièce plus forte que les procédures traditionnelles du soudage.

Quelques pièces suggérées sont : battes de baseball, putters de golf, cylindres à air, munitions, raccords de tuyau d'huile et d'eau, pièces de bicyclette, équipements médicaux, équipements marins, équipements électriques, équipements photographiques (voir figure I.9).



**Figure I.9 :** *Quelques pièces commerciales soudées par RFW.* [3]

### I.8.2. Aéronautique

Des pièces soudées par friction rotative à pleine puissance sont utilisées dans une grande variété d'applications aéronautiques, telles que les roues de turbine, les arbres, les soupapes de pression, les entretoises de train d'atterrissage, les assemblages à vis à billes et les composants de l'actionneur. Beaucoup des pièces soudées ont été utilisées dans les satellites, les navettes spatiales et le télescope spatial Hubble (voir figure I.10).



**Figure I. 10 :** *Une pièce soudée par RFW utilisée dans les satellites.* [8]

### I.8.3. Hydraulique

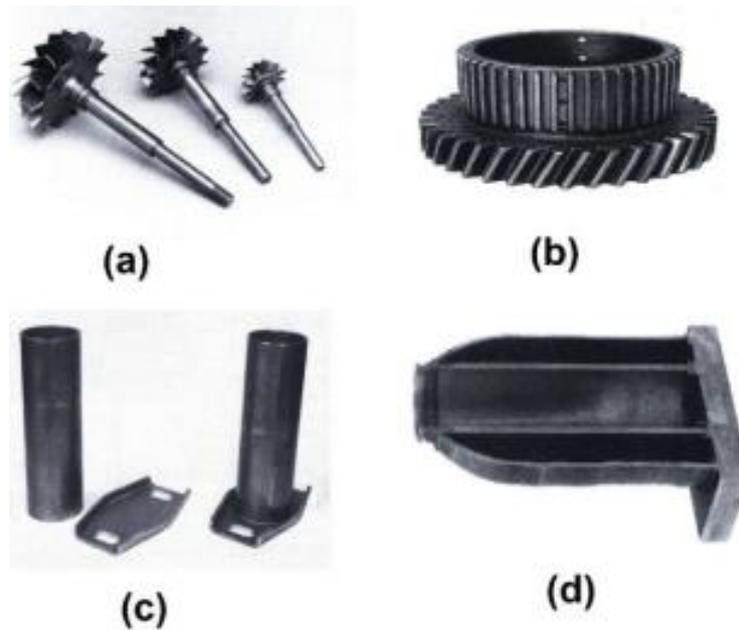
Les cylindres et les valves hydrauliques sont les principaux candidats pour le soudage par friction rotative. Les cylindres peuvent être entièrement usinés et les capuchons peuvent être soudés par la suite, ce qui permet de réduire les coûts et de limiter les besoins en stocks. Pour les formes irrégulières, le cylindre peut être soudé à une pièce de matériau plus grande afin de réduire les coûts et le temps d'usinage. Ce processus se prête également aux pistons et les soudures de l'arbre ainsi que les orifices latéraux (voir figure I.11).



**Figure I.11** : Des pièces soudées par RFW utilisées dans le domaine d'hydraulique. [3]

### I.8.4. L'automobile

Dans plusieurs applications automobiles, il est nécessaire d'utiliser différentes charges de contrainte sur différents types des matériaux. Dans certains cas, l'exigence de deux types de métal sur une partie comme une vanne sert l'exigence de mettre le bon métal au bon endroit. En utilisant un plus fort matériau pour la tige et un matériau tolérant à la chaleur pour la tête. D'autres applications incluent, bobines différentielles, arbres de transmission, essieux, jonctions d'arbre de roue avant, jantes et roues (voir figure I.12).



**Figure I. 12** : Une pièce d'automobile soudée par RFW. [3]

### **I.9 Assemblage des matériaux dissemblables :**

Depuis 1966, le soudage par friction, un procédé d'assemblage de métaux à l'état solide, a été utilisé avec succès pour assembler une large gamme de métaux qui sont généralement considérés comme non soudables. Ces soudures à pleine résistance, lorsqu'elles sont testées à l'hélium, dépassent les exigences de 10 à 9, montrant moins de fuites à le joint que par le métal de base. De nombreuses entreprises exigeantes utilisent des soudures bimétalliques produites par Interface Welding, fondée en 1967.

Les applications des produits vont des connecteurs électriques aux systèmes de vide et de pression, en passant par les caloducs et les systèmes de stockage de la pression des satellites, les composants de moteurs à turbine, les raccords cryogéniques, les joints en verre ou en métal et de nombreux autres produits critiques. Cette technologie est développée quotidiennement dans nos installations.

Les soudeurs par friction sont suffisamment polyvalents pour assembler une large gamme de formes de pièces, de matériaux et de tailles de soudure. Les applications typiques de la soudure par friction comprennent les composants d'avions et de l'aérospatiale, les outils de coupe, les machines agricoles, les pièces automobiles, les pièces des champs pétrolifères, les conteneurs de déchets, des équipements militaires, des ébauches de fuseaux et des matériaux bimétalliques.



**Figure I.13 :** Des pièces en matériaux dissemblables soudées par RFW. [3]

### I.9.1. Domaine agricole

Le soudage par friction est très utilisé dans les secteurs de l'agriculture et du camionnage car les soudures sont de qualité forgée, avec une soudure bout à bout à 100 % sur toute la surface de contact. Cette liaison est suffisamment solide pour supporter les contraintes et le couple élevés exigés par les machines lourdes composants, par exemple, les tiges à des yeux de tige. 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 (Figure I.14) [24].



**Figure I.14 :** Des pièces soudées par(RFW) utilisées dans le domaine agriculture. [8]

### I.9.2. Les tiges de forage

Le soudage par friction rotative (RFW) est également utilisé dans la pétrochimie, par exemple pour le soudage de brides à des valves hydrauliques (Figure I.15) [8], ou pour le soudage des tubes de forage [25].

Tiges de forage jusqu'à 139,7 mm (5 ½") de diamètre soudées par friction dans la maison.

Les tiges de forage sont fabriquées jusqu'à un diamètre de 406 mm et une longueur effective de 9 mètres. Tous les raccords d'outils sont nitrurés pour une meilleure résistance à l'usure.



**Figure I. 15 :** Fixation d'une bride à une valve hydraulique. [8]

## I.9. Conclusion partielle

Le soudage par friction rotative (RFW) présente beaucoup d'avantages par rapport aux différents procédés évoqués précédemment, tels que la facilité de mise en œuvre et la basse relative de la température de soudage (inférieure à la température de fusion), tout en restant compétitif du point de vue de la vitesse du soudage et des géométries des pièces à souder vis à vis aux procédés de soudage par fusion.

**Bibliographie**

- [1] <http://fr.calameo.com/books>. Téléchargé le 12/04/2020
- [2] <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction/IBS,Presentation,expertise>, Procédé de soudage, Dr.ir. Koen Faes 2018
- [3] R. Sahoo, P. Samantaray, Study Of Friction Welding, department of Mechanical Engineering/National Institute of Technology/Rourkela/2007.
- [4] D.I. Pantelis, National Technical University of Athens School of Naval Architecture and Marine, Engineering Shipbuilding Technology Laboratory /SNAME, Greek Section, Technical Meeting, 29 May 2014.
- [5] F. Thibeault, L. St-Georges, L. I. Kiss, R. Das, Étude numérique et expérimentale des mécanismes thermiques lors du soudage par friction malaxage Janvier 2011 Conférence : Xème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, At. Saguenay, Québec
- [6] L. Jeffus, “Welding: Principles and Applications”, Delmar Cengage Learning, Seventh Edition, 2012, USA.
- [7] L. YANG, “Modelling of the inertia welding of Inconel 718”, Thèse PhD, Univeristé de Birmingham, 2010. Modelling of the inertia welding of Inconel 718
- [8] K.Faes. Belgisch Instituut voor Lastechniek. Téléchargé de <http://www.bilibs.be/fr/soudage-par-frictio> le : 12/08/2018
- [9] D.D. Kautz, “Fundamentals of Friction Welding”, ASM Handbook, Volume 6A, Welding Fundamentals and Processes, 2011.
- [10] W. Li, A. Vairis, M. Preuss and T. Ma, “Linear and rotary friction welding review”, International Materials Reviews, 2016.
- [11] M. Kimura, K.Seo, M.Kusaka and A.Fuji, “Observation of joining in friction stage and improving friction welding method”, JSME international journal, Series A, Vo.l 46, N°3, 2003
- [12] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati and A. B. Ismail, “Advances in friction welding process: a review”, Science and Technology of Welding and Joining 2010 VOL 15 N° 7, 534-558.
- [13] S. B. Jamaludin, Y. C. Keat and Z. A. Ahmad: ‘The effect of varying process parameters on the microhardness and microstructure of Cu–steel and Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> friction joints’, J. Teknol., 2004, 41, (A), 85–95.
- [14] R.S. Mishra, and Z. Ma, Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005. 50(1): p. 1-78.

- [15] K. Elangovan, V. Balasubramanian, and M. Valliappan, Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in 71 AA6061 aluminium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008. 38 (3-4): p. 285-295.
- [16] T. Watanabe, Observation of the Solid State Welded Interface between Steel and Aluminum Alloy Using a Rotating Pin-Solid State Welding of Dissimilar Metals Using a Rotating Pin (Report 2). *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2005. 23(4): p. 603-607.
- [17] W. Li, A. Vairis, M. Preuss and T. Ma, "Linear and rotary friction welding review", *International Materials Reviews*, 2016.
- [18] P. Sathiya, S. Aravindan and A. N. Haq: 'Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, 31, (11), 1076–1082.
- [19] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati and A. B. Ismail, "Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminum alloy joined by friction welding", *Science and Technology of Welding and Joining 2010 VOL 15 N° 7*, 534-558.
- [20] F. Assaf. These de doctorat ; Comportement en fatigue de joints daluminium 7075-T6 soudés par friction malaxage parachevés, Université de Montreal. 2013
- [21] Y. C. Chen, J. C. Feng, "Precipitate evolution in friction stir welding of 2219-T6 aluminum alloys." *Materials Characterization* 60(6) : 476-481.2009.
- [22] R. Cazes, Soudage par friction-malaxage. *Techniques de l'ingénieur*. BM7746. Avril.2003.
- [23] Dr. Ir. Koen Faes, IBS (Traduction : M.C. Ritzen - IBS-BIL) Le soudage par friction, un procede de soudage multiple et innovateur.  
[https://www.academia.edu/1899182/Le\\_soudage\\_par\\_friction\\_un\\_proc%C3%A9d%C3%A9\\_de\\_soudage\\_multiple\\_et\\_innovateur](https://www.academia.edu/1899182/Le_soudage_par_friction_un_proc%C3%A9d%C3%A9_de_soudage_multiple_et_innovateur)
- [24] R. Cazes, Soudage par friction. *Techniques de l'ingénieur*. B 7 745.
- [25] R. Cazes, Soudage par friction-malaxage. *Techniques de l'ingénieur*. BM7746. Avril.2003.

## ***Chapitre II. Etat de l'art sur le soudage par friction rotative de cuivre et de l'acier***

### **II.1. Introduction**

Le soudage est un procédé 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. Le soudage peut être effectué avec ou sans emploi d'un produit d'apport. On considère qu'un matériau métallique soudable par un procédé et pour un type d'application, lorsqu'il est possible d'assurer une continuité métallique (chimique, mécanique etc.) par la constitution d'un joint soudé qui, par ses caractéristiques locales et les conséquences globales de sa présence, satisfait au mieux les propriétés requise pour l'application souhaitée [1].

Dans les machines de soudage par friction, l'utilisation du mouvement relatif entre les pièces à souder sous l'effet de la pression de contact sert à la conversion de l'énergie mécanique en une quantité de chaleur au niveau du joint de soudure à l'aide du frottement produit à l'interface de contact. La génération du frottement est effectuée selon le type et les directions de ce mouvement. On distingue trois types de mouvements : mouvement de rotation, mouvement alternatif et mouvement linéaire [2].

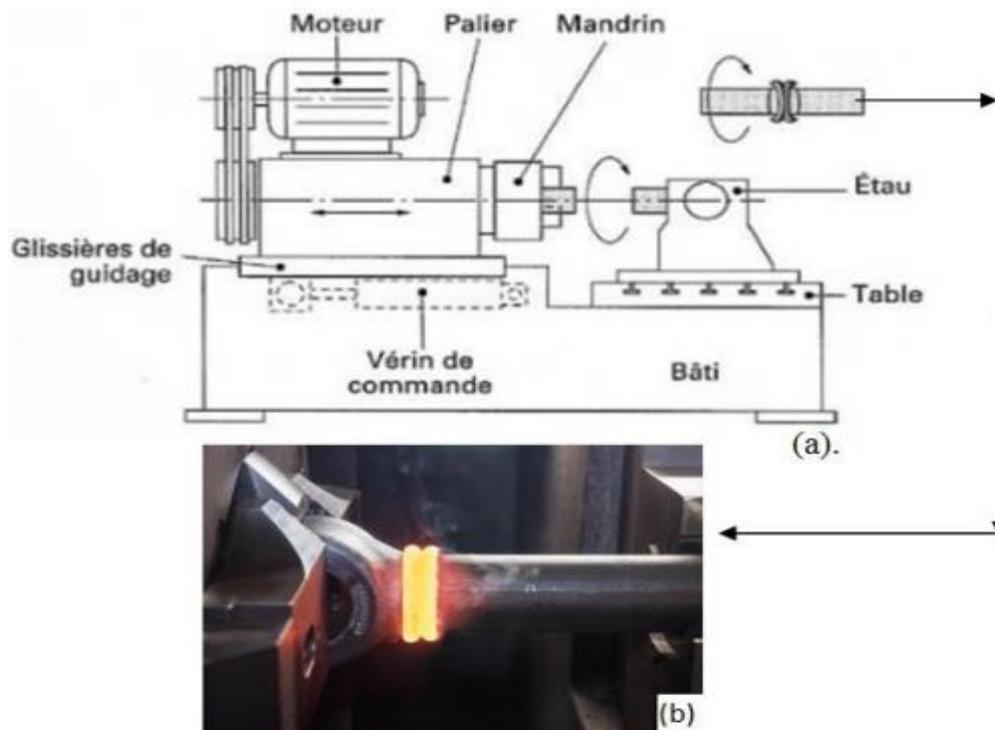
### **II.2. Intérêt de soudage de cuivre avec l'acier**

Le soudage par Friction Rotation a un grand intérêt, il exclut le métal d'apport à des températures inférieures aux températures de fusion des matériaux à assembler. De plus des vitesses de soudage élevées et une facilité de mise en œuvre appréciable. Ces paramètres sont nécessaires pour souder ces matériaux dissimilaires acier / cuivre. Le problème majeur dans l'assemblage dissimilaire d'alliage de cuivre et l'acier est dans sa faible résistance mécanique dans les zones de liaison, en raison de la formation de l'intermétallique fragile. La formation des intermétalliques est due à la différence des propriétés physiques du fer et le cuivre, parmi d'autre en ce qui concerne leur, propriétés thermiques différentes, la dilatation thermique dissemblable, la capacité calorifique et la conductivité thermique, la transformation du réseau, la grande différence entre les points de fusion (1085 ° C pour l'alliage de cuivre et 1535° C pour l'acier), rendre le procédé de soudage très complexe. La solubilité presque nulle du fer dans le cuivre crée un grand écart entre les métaux et causant la distorsion, et aussi la production des cavités et des fissures, conduisant à la réduction des propriétés mécaniques après les processus d'assemblage. Plusieurs études ont été menées sur ce sujet d'intérêt industriel. Notre objectif

est l'étude du soudage par friction rotation entre un acier (A60) de teneur 53% du carbone et un alliage de cuivre. De plus, on a concentré notre étude sur l'effet des paramètres de soudage (vitesse de rotation, vitesse d'avance et la pression) sur la microstructure du joint soudure, afin de contrôler l'épaisseur de la couche de composés intermétalliques et d'assurer des bonnes propriétés mécaniques du joint de soudure.

### II.3. Soudage par friction rotation

Le soudage par friction rotation est obtenu grâce à l'échauffement des deux matériaux à assembler, souvent des pièces de section circulaire. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique. Généralement, l'une des pièces est en rotation alors que la deuxième reste statique. La figure II.1 présente une machine de soudage par friction ayant une morphologie très simple et des avantages intéressants et appréciés dans les ateliers de construction mécanique [3]. On note que la qualité de la soudure dépend de plusieurs paramètres : la vitesse de rotation de l'outil, 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 dissimilaires, de plus, sa mise en œuvre est assez facile. De nombreuses études [4-5] ont été réalisées sur le soudage hétérogène de l'acier avec le cuivre pur ou en utilisant ses différents alliages, par friction rotative.



**Figure II. 1** : Soudage par friction (a) schéma d'une machine de soudage par friction, (b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydrauliques. [3]

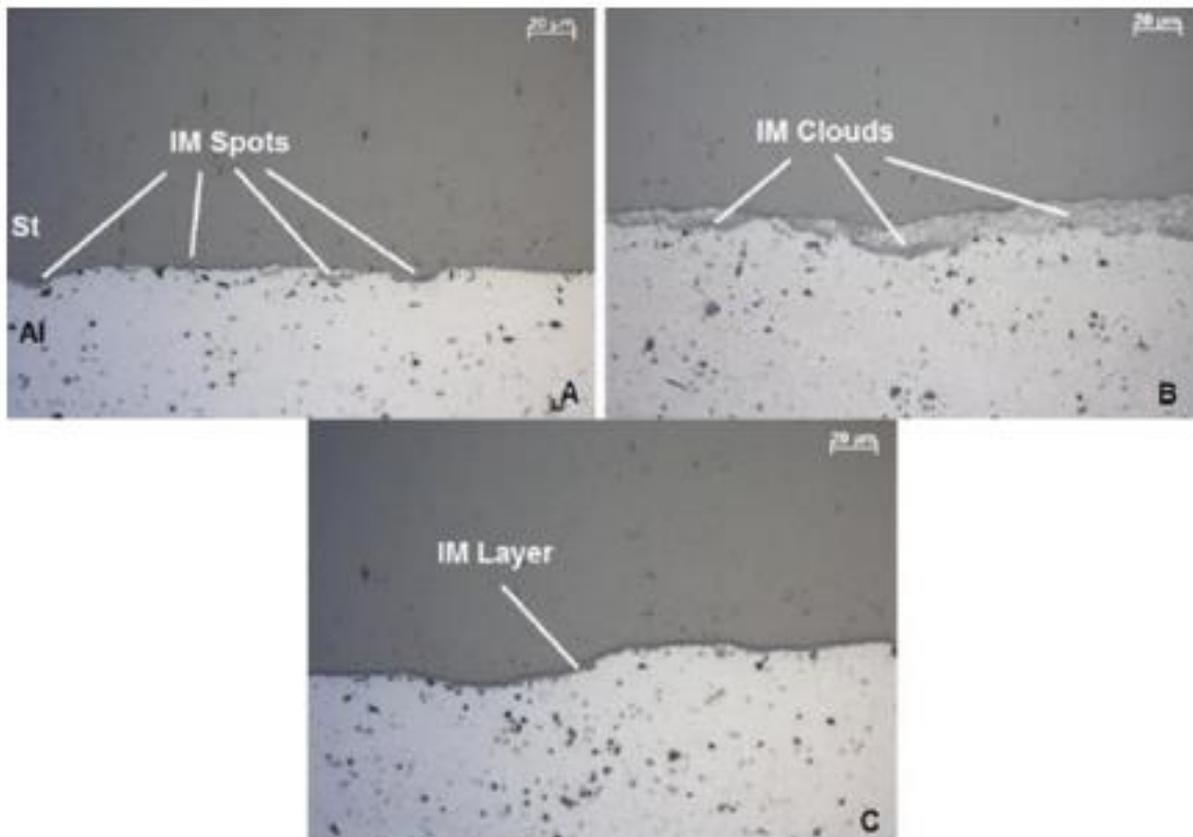
Ces recherches ont démontré qu'il est possible d'atteindre des résistances mécaniques équivalentes à celle des matériaux de base (résistance mécanique en traction de 300 MPa pour un alliage 6061 et de 380 MPa pour un alliage 2017[4, 6], Ces résultats sont dus au fait que l'épaisseur de la couche de l'intermétallique est très mince, pour des paramètres opératoires optimisés.

Rombaut et al. [7] avaient réalisé des soudures par friction des alliages d'aluminium de différentes nuances et l'acier. Ils avaient remarqué que l'épaisseur de la couche IMC avait augmenté presque proportionnellement avec le temps de friction avec un taux en fonction du type d'alliage d'aluminium. Ces auteurs ont noté une augmentation de la pression de friction ce qui améliore la vitesse de croissance de la couche IMC, et que cette couche était constituée de particules granulaires aléatoirement distribuées (Figure I.2.).



**Figure II. 2 :** Joint dissimilaire A5083 / S10C obtenu par le soudage par friction : composés intermétalliques à l'intérieur de la couche IMC d'après l'analyse EDS de la soudure [7].

Malgré le succès de ce procédé de soudage, il peut engendrer plusieurs types de défauts tel que : fissures, caries ou porosités. Selon les paramètres de soudage utilisés, différentes formes de couches intermétalliques ont pu être observées. La figure (II.3.) représente les formes les plus courantes [7].



**Figure II.3 :** Différentes formes de couches intermétalliques dans une soudure :(a) taches intermétalliques, (b) poussière de intermétallique, (c) couche intermétallique. [7]

Shanjeevi et al. [8] ont étudié les propriétés mécaniques et métallurgiques du soudage par friction rotation d'un acier inoxydable 304L avec du cuivre. Ils ont utilisé la microdureté, la microscopie optique, la microscopie électronique à balayage. Ils ont remarqué que le soudage était bien fait et sans défaut avec formation de bourrelet au niveau du joint soudé.



**Figure II.4 :** Joint obtenu par friction rotative [8]

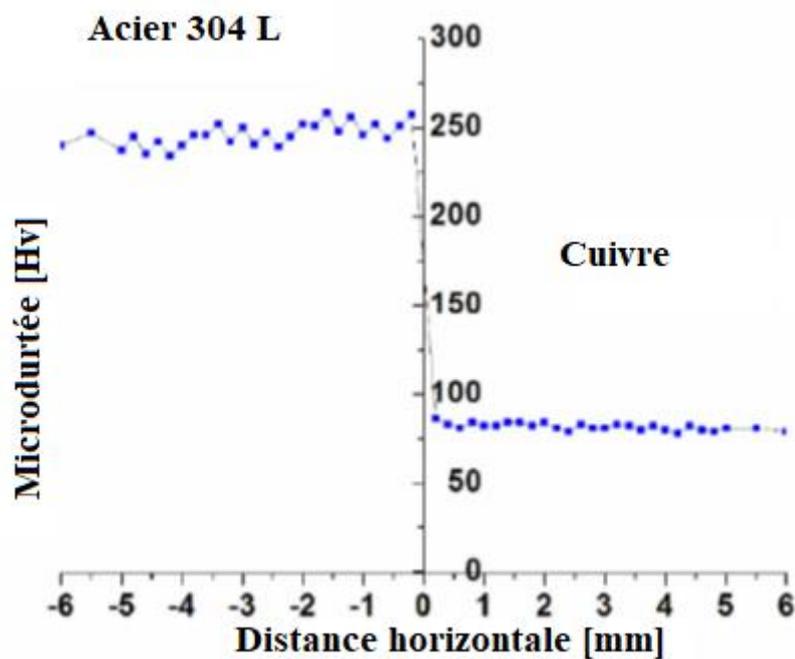
Les essais de tractions appliqués sur les éprouvettes soudées ont montré que la rupture était ductile. De plus ; la rupture s'effectue au niveau du cuivre (Fig.II.5).



**Figure II.5 :** *Eprouvette après l'essai de traction du joint soudé*

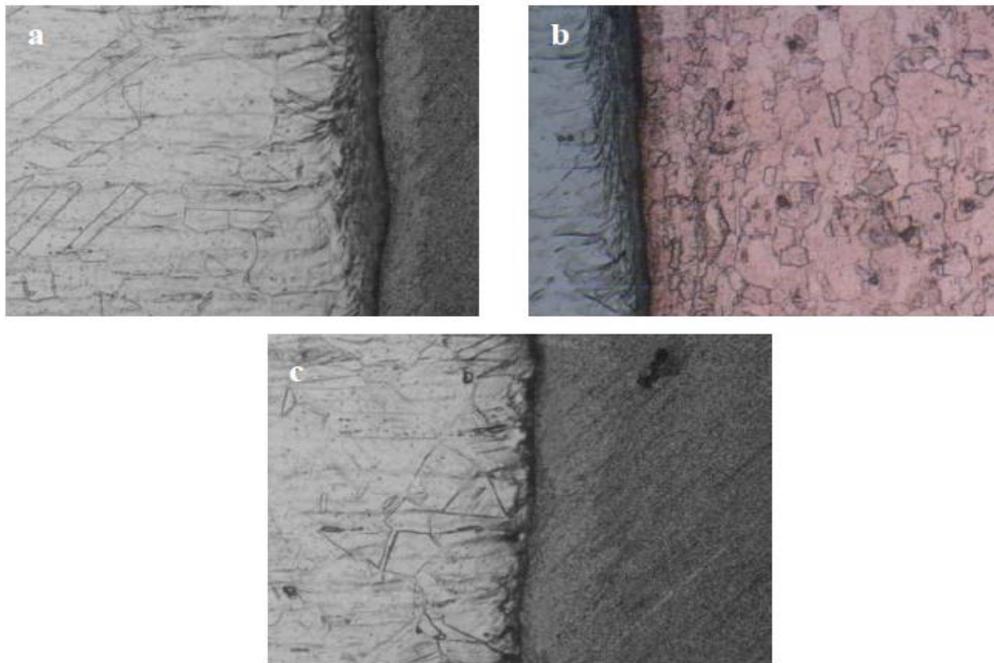
*Acier inoxydable/Cuivre [8].*

Le profil de microdureté réalisé sur le joint soudé a montré que l'acier a une grande dureté par rapport au cuivre (FigII.6 ).



**Figure II.6 :** *Profil de microdureté Vickers le long du joint soudé [8].*

Les observations microscopiques ont montré la microstructure du joint soudé et en particulier la ZAT (Zone affectée thermiquement) (Fig II.7).



**Figure II.7 :** Microstructures du joint soudé Acier inoxydable/Cuivre [8].

Enfin, les auteurs ont trouvé que l'utilisation d'une grande pression lors du soudage donne un joint de soudure de grande résistance à la traction.

#### **II.4. Assemblage de matériaux en acier inoxydable et en cuivre avec (FW)**

Mumin Sahin. [9] est étudié les variations mécaniques et métallurgiques aux interfaces entre l'acier inoxydable austénitique commercial et matériaux en cuivre soudés par friction (FW). Le soudage par friction peut être réalisé à des taux de production élevés et est donc économique dans son fonctionnement. Dans les applications où le soudage par friction a remplacé d'autres procédés d'assemblage, le taux de production a été considérablement augmenté. Lors de l'assemblage de métaux différents tels que le cuivre et l'acier, La soudure par friction est d'une grande importance dans les applications. Le soudage est possible dans la plage limitée de bien qu'il existe des problèmes pour le soudage en raison de les composés intermétalliques fragiles et la conductivité. Pour minimiser les problèmes, la soudure par friction Les paramètres doivent être pris en considération pour les soudures résistantes. La chaleur dans le soudage par friction est générée par la conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique et visco-plastique travail de déformation (énergie) à l'interface des pièces pendant la rotation sous pression. Cette déformation visco-plastique travail (énergie) produit également de l'énergie thermique par le biais de la viscosité interne dissipation. [9]

Comme le montrent la figure II.8, nous voyons que l'axe le raccourcissement du côté cuivre est bien plus que celui du côté en acier inoxydable. Les valeurs de raccourcissement axial des joints.

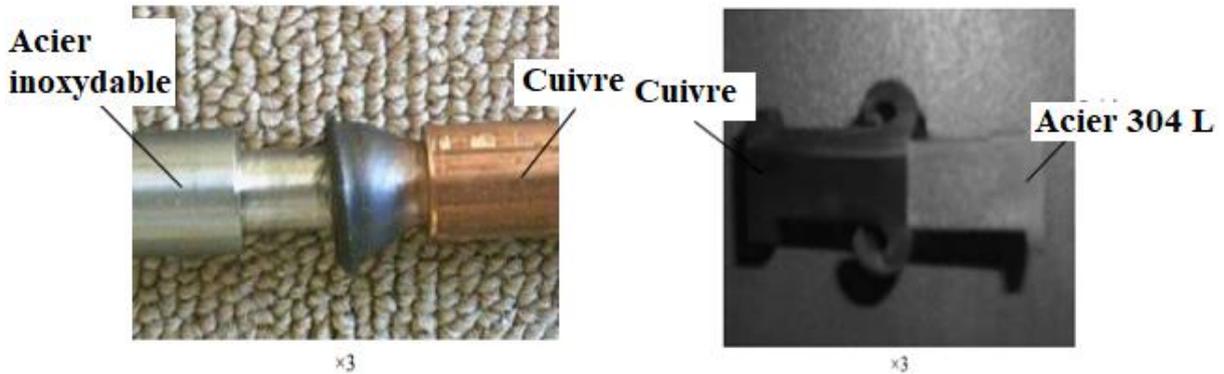


Figure II.8 : Joint obtenu par friction rotative [9]

#### II.4.1. Variations de la dureté des pièces soudées

Les paramètres optimaux sont obtenus pour les joints. Les joints sont soumis à des essais de traction et de microdureté. Les résultats de l'essai de microdureté sur la distance horizontale de joint soudé sont présentés dans la figure II.9. On peut voir qu'autour de la dureté du cuivre augmente légèrement. Comme le montre la figure II.10, les valeurs de dureté le long de l'interface la distance verticale pour différentes distances horizontales sur Le côté en acier inoxydable des joints est plus élevé selon la côté cuivre, car il est avancé de l'interface à la fois jusqu'à la fin des pièces et des métaux de base.

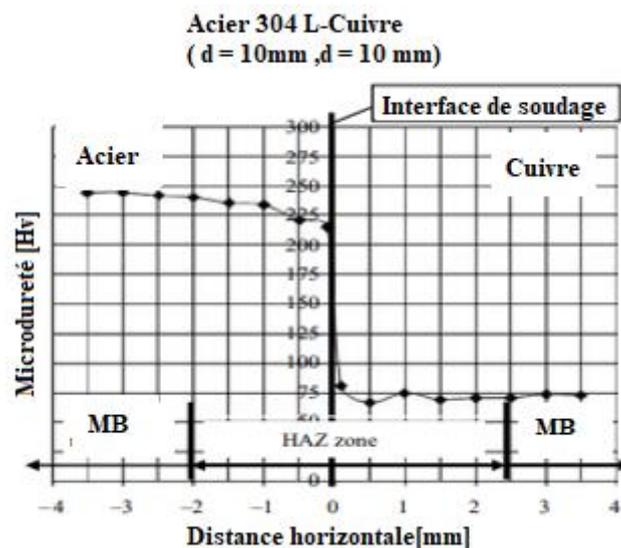


Figure II.9 : Répartition de la dureté sur la distance horizontale des joints [9]

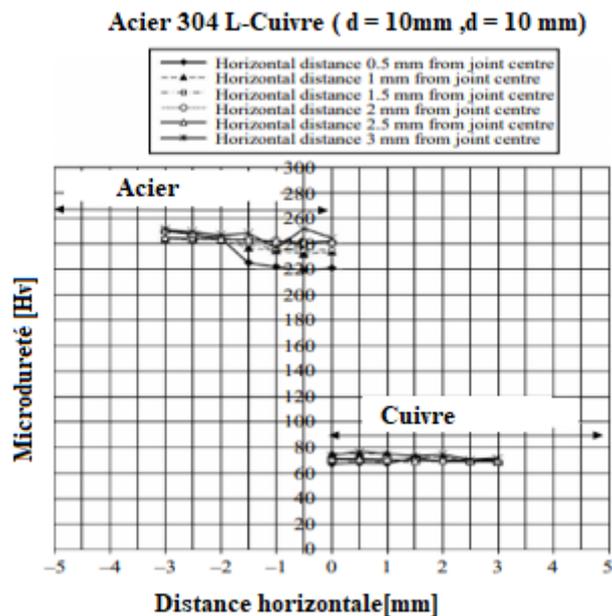


Figure II.10 : Distribution de la dureté sur la distance verticale pour différentes distances horizontales des joints. [9]

### II.5. Principe de soudage par friction radiale de cuivre et Acier 35CrMnSi

Wei et Al. [10] Ont étude sur les performances du soudage par friction radiale par inertie des alliages de cuivre à l'acier 35CrMnSi. Ils ont utilisé la microdureté, la microscopie optique, Selon la même spécification de soudage, la région de HAZ est liée à la conductivité thermique et point de fusion de l'alliage de cuivre. En général, le joint HAZ du côté acier sera plus large en raison de point de fusion et la conductivité thermique plus faible de l'alliage de cuivre. En conséquence, la région de HAZ dans l'acier est présentée dans la figure II.11.

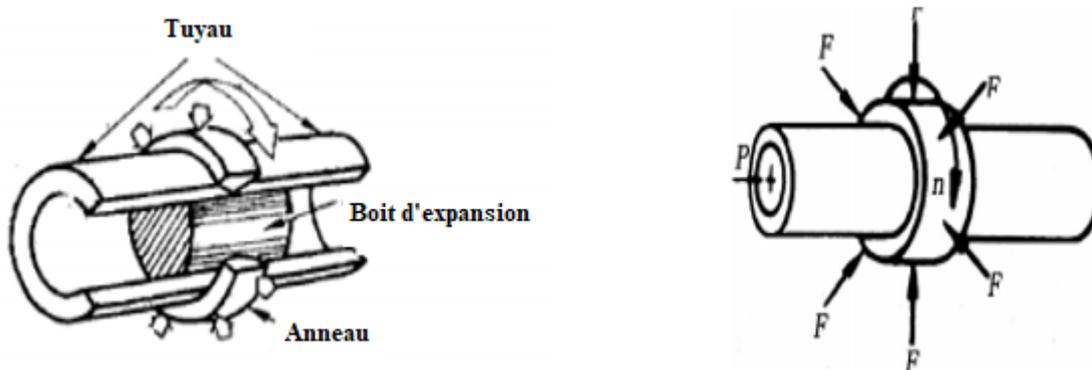
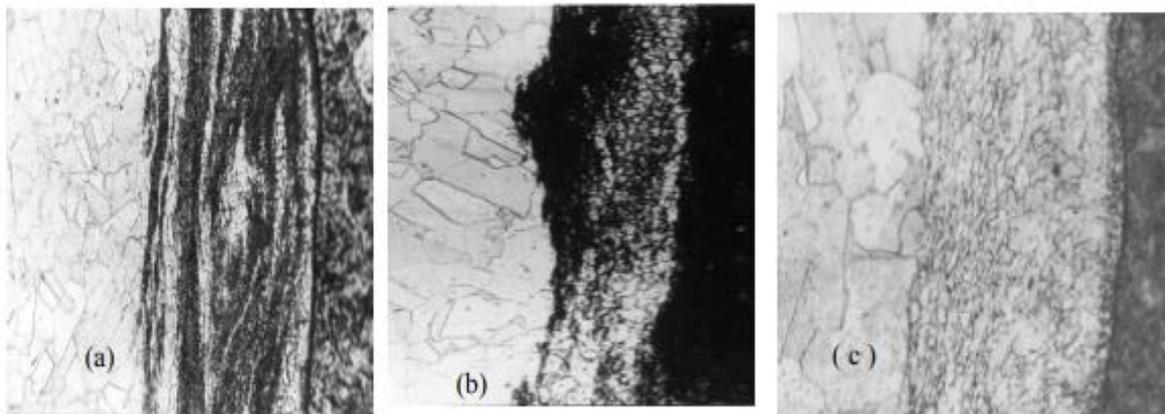


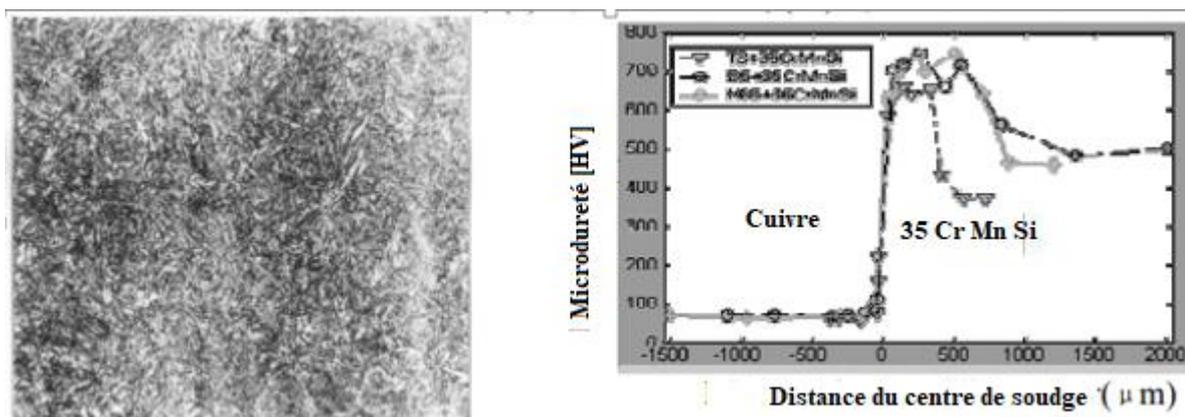
Figure II.11 : Soudage par friction radiale inertielle (IRFW). [10]

La figure II.12 montre une vue en coupe microscopique de trois échantillons différents soudés au 35CrMnSi respectivement. L'alliage de cuivre est situé sur le côté gauche, et le 35CrMnSi côté droit. La zone affectée par la chaleur (HAZ) du côté de l'acier 35CrMnSi est indiquée dans la figure II.13.



**Figure II.12 :** Microstructures du joint soudé (400x), (a) H96+35CrMnSi, (b) B5+35CrMnSi, (c) T3+35CrMnSi. [10]

La microdureté est un indice important pour évaluer les propriétés du matériau. La figure II.14 montre le profil de dureté en coupe transversale de l'interface de connexion des joints soudés par friction. L'alliage de cuivre est situé du côté gauche, et le 35CrMnSi du côté droit. La distribution de la microdureté des joints a été mesurée le long du centre axial, à 3,5 mm du centre axial et à des intervalles de 0,5 mm de l'interface de soudure.

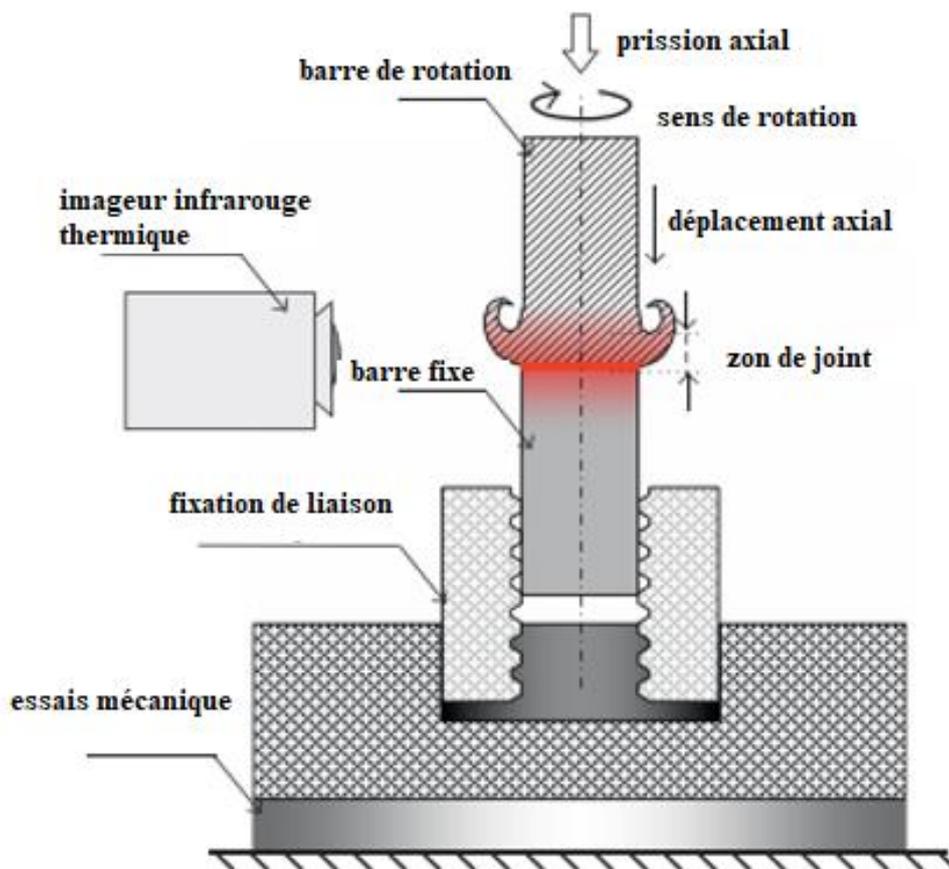


**Figure II.13 :** Microstructures HAZ 35CrMnSi Acier (530x) joints. [10]

**Figure II.14 :** profile de micro dureté. [10]

## II.6. Soudage par friction à entraînement continu Al/Fe et Joints Cu/Fe

Yanni Wei 1 and Fu Sun2. [11] Ces recherches ont démontré qu'il dont la compatibilité métallurgique est différente, ont été unis par un frottement d'entraînement continu la soudabilité par friction a été étudiée. La microstructure de l'interface d'assemblage a été analysée par micro électronique à balayage et les compositions chimiques ont été testées par spectroscopie à dispersion d'énergie. La résistance de l'assemblage a été évaluée par et la fracture a été détectée par analyse de diffraction des rayons X. Les résultats montrent que des joints sains de Al/Fe et Cu/Fe peuvent être obtenu par un procédé de soudage par friction à entraînement continu sont présentés dans la figure II.15.



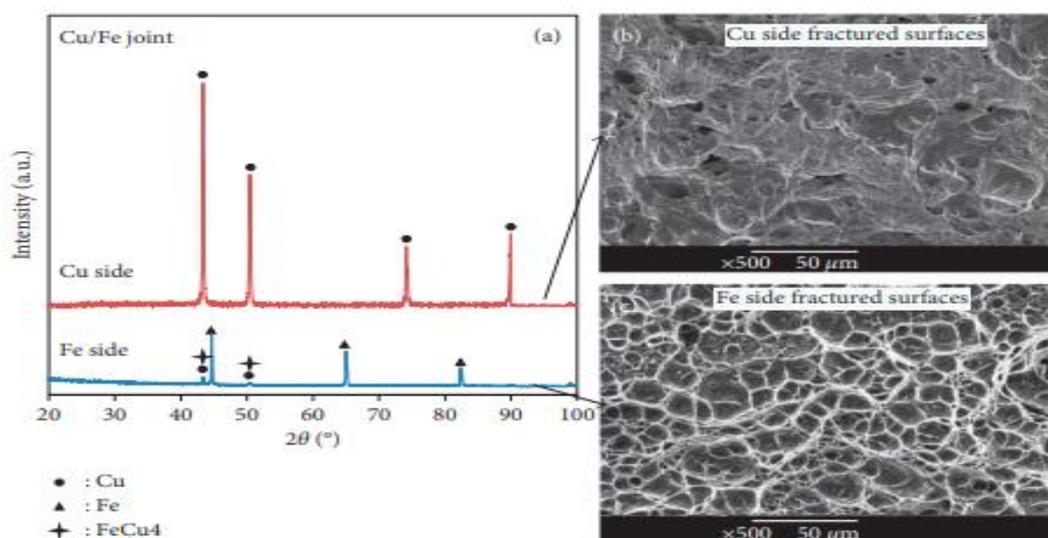
**Figure .II.15 :** Schéma de principe du soudage par friction à entraînement continu. [11]

Le figure expérimental est présenté dans la figure II.16. Avant le soudage, la barre rotative a été tournée autour de son axe alors que la barre fixe était irrotative. Les vitesses de rotation étaient 1200 tours/minute pour les couples Al/Fe et 1900 tours/minute pour les couples Cu/Fe.



**Figure II.16 :** Apparence des joints (a) Al/Fe et (b) Cu/Fe à différentes pressions de soudage. [11]

Les différents métaux purs Al/Fe et Cu/Fe avec la compatibilité métallurgique ont été rejoints par l'entraînement continu la soudure par friction. La microstructure de l'interface d'assemblage a été analysée, la résistance de l'assemblage a été évaluée par essai de traction de cisaillement, et la fracture a été testée par analyse diffraction des rayons X. Les joints sonores de Al/Fe et Cu/Fe peuvent être obtenus par un procédé de soudage par friction à entraînement continu sont présentés dans la figure II.17.



**Figure II.17 :** Analyse de la phase DRX et morphologies des surfaces fracturées des joints Cu/Fe. [11]

## **II.7. Conclusion partielle**

Le soudage par friction rotation (FRW) correspond à une méthode d'assemblage à l'état solide permettant de souder des alliages de même et différentes natures. Cette technique est utilisée dans différents secteurs. Sur le plan industriel, le procédé FRW est aujourd'hui utilisé presque exclusivement pour le soudage des alliages de cuivre. L'assemblage de matériaux dissimilaires tels qu'un alliage de cuivre et un acier présentent un intérêt pour l'allègement des structures mécaniques.

**Bibliographie**

- [1] G. Murry, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques, 1994(M715) : p. M715. 1-M715. 35.
- [2] W. Robert, Jr. Messler, "Principles of wilding Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2004
- [3] R. Cazes, Soudage par friction 1980 : Ed. Techniques Ingénieur.
- [4] N. Yamamoto, et Al. Formation of intermetallic compounds in friction bonding of Al alloys to steel. In Materials science forum. 2007. Trans Tech Publ.
- [5] S.D. Meshram, and G.M. Reddy, Friction welding of AA6061 to AISI 4340 using silver interlayer. Defence Technology, 2015. 11(3): p. 292-298.
- [6] Kawai, G., et al., Friction weldability of aluminium alloys to carbon steel. Welding international, 2000. 14(2): p. 101-107.
- [7] P. Rombaut, W. De Waele, and K. Faes. Friction welding of steel to ceramic. in Sustainable Construction and Design 2011 (SCAD). 2011. Ghent University, Laboratory Soete.
- [8] C. Shanjeevi, S. Satish Kumar and P. Sathiya, "Multi-objective optimization of friction welding parameters in AISI 304L austenitic stainless steel and copper joints", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture published online 10 November 2014.
- [9] S. Mumin, (2009), "Joining of stainless steel and copper materials with friction welding", Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 61 Iss 6 pp. 319 – 324
- [10] W. Wu 1, a, L, Yun Zhu 2, b, G, Feng Wu 1, c and H, Bin Xu1, d. Study on Performance of Inertia Radial Friction Welding of Copper-Alloy to 35CrMnSi Steel, Advanced Materials Research Vols. 291-294 (2011) pp 968-974.
- [11] W. Yanni 1 and F. Sun2. Microstructures and Mechanical Properties of Al/Fe and Cu/Fe Joints by Continuous Drive Friction Welding, Published 27 Jun 2018.

## Chapitre III. Méthodes Expérimentales et Techniques d'Analyse

### III.1 Introduction

Les matériaux dissemblables peuvent être joints par diverses méthodes d'assemblage. Certaines d'entre-elles permettent le démontage, d'autres créent une jonction permanente.

Dans notre étude, nous avons centré les essais sur la mise en évidence des paramètres significatifs du soudage par friction rotative, qui seront à l'origine de la réalisation du cordon de soudure. Cette approche expérimentale nous a permis de constater que la qualité de soudure dépend à la fois de la nature du matériau et du choix des paramètres (vitesse de rotation, vitesse d'avance, temps et force de forgeage appliquée).

Dans une première partie, nous présenterons deux matériaux ont été utilisés acier A60 et cuivre pure dans son état de livraison (avant soudage). La deuxième partie visée la procédure suivie pour réaliser le système de soudage et la réalisation des pièces soudées par friction rotative et enfin, la dernière partie seront consacrées respectivement à la présentation des techniques de caractérisation microstructurale et des techniques de caractérisation mécanique.

### III.2 Conditions expérimentales

#### III.2.1 Matériaux de base utilisés

Dans cette étude, deux matériaux ont été utilisés comme des métaux de base pour réaliser des joints dissemblables en appliquant le soudage par friction rotative. Ces deux matériaux sont des barres rondes en cuivre et en acier ordinaire, les dimensions des barres sont de 10 mm de diamètre et 80 mm de longueur. (Fig.III.1).

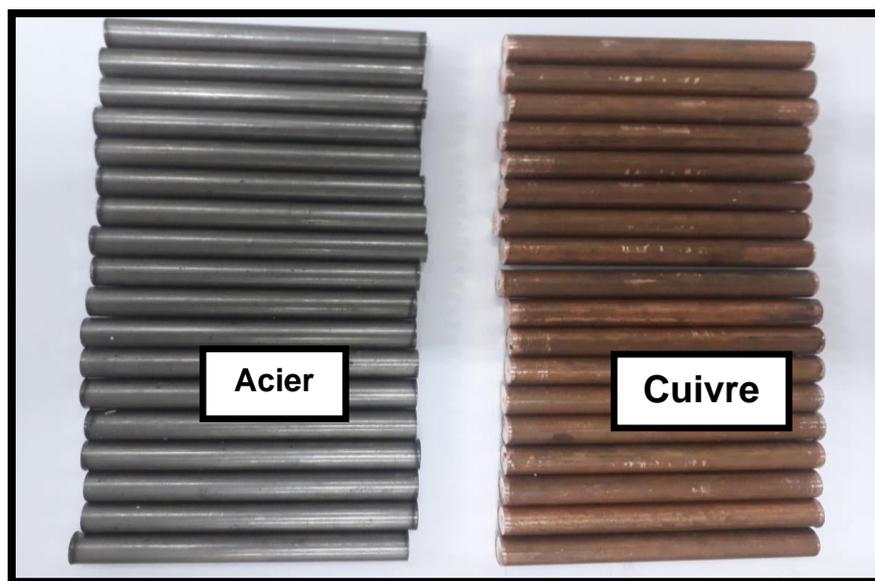


Figure III. 1 : Barres cylindriques des deux barre en cuivre et en acier

### III.2.2 Propriétés mécaniques

Le comportement du matériau à la traction est représenté par la courbe contrainte – déformation de la figure III.2. (a) l'essai de traction a été réalisé sur une éprouvette normalisée d'un acier A60 et la figure III.2. (b) représenté l'essai de traction a été réalisé sur une éprouvette normalisée d'un cuivre à la température ambiante.

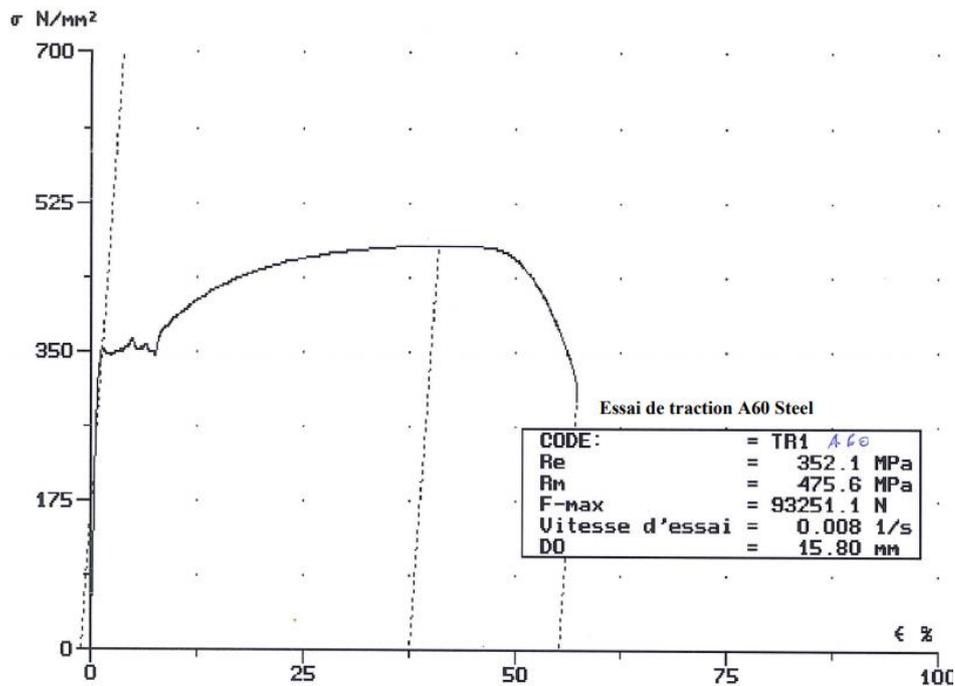


Figure III.2 : (a) Courbe Contrainte – Déformation de l'acier A60

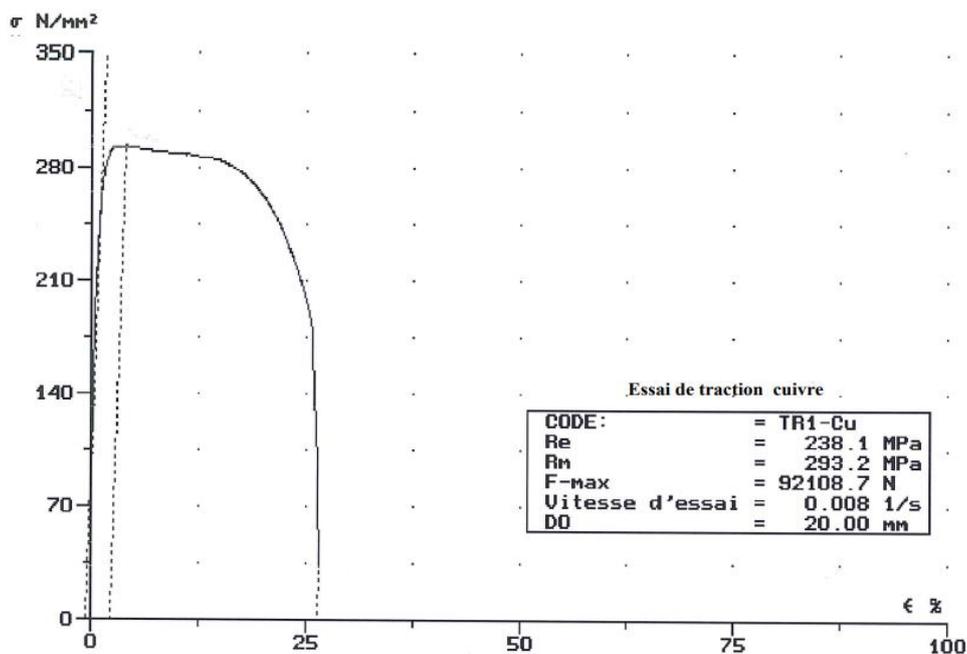


Figure III.2 : (b) Courbe Contrainte – Déformation de cuivre

Les propriétés mécaniques de ces deux métaux sont présentées dans le tableau III.1.

**Tableau III.1** Propriétés mécaniques de chaque métal (Cu et Acier).

Dimensions (mm)		Code	Caractéristiques mécaniques				Dureté Vickers correspondan te HV	Equipement d'essai
			Elasticité Re(MPa)	Résistance Rm (Mpa)	Allongement A%	Rm/Re		
Larg/dim	Ep							
Ø 10	-	TR1-Fe	603,3	751,0	12,2	1,24	216,0	MFL UHP 600KN
Ø 10	-	TR2-Cu	238,1	293,2	07,0	1,23	85,5	MFL UHP 600KN

### III.3 Procédé de Soudage

#### III.3.1 La machine utilisée

La machine utilisée dans notre étude est une fraiseuse universelle **PMO UF 1.5** (figure III.3) installée au sein de laboratoire du génie mécanique (département de Génie civil – université de Bordj Bou Arreridj).

Notre méthodologie de conception s'appuie sur le concept d'entité de fabrication déjà fort utilisé en génération de la gamme d'usinage. Nous présentons les activités permettant de passer des entités d'usinage à la structure réelle des pièces usinées.

Afin de mettre en place un mécanisme de soudage par friction rotative plusieurs idées et essais ont été proposés pour arrivé a ce model réalisé.

Le principe de procédé de soudage par friction rotative est de faire une soudure de deux barres cylindriques, on immobilise alors une partie tandis que l'autre est mise en rotation à une vitesse constante.

La partie mobile de notre système est assurée par le fraiseuse universelle qui nous permettre à régler la vitesse de rotation selon la demande, les mesures de températures sont aussi assurées par un thermomètre infrarouge.

Le dispositif expérimental (figure III.3) que nous avons adapté sur une fraiseuse universelle permet d'assurer un cycle de soudage par friction rotative.



**Figure III.3 :** Machine de fraisage de marque PMO UF 1.5

### III.3.2 Système de fixation

#### III.3.2.1 Porte-outil typique

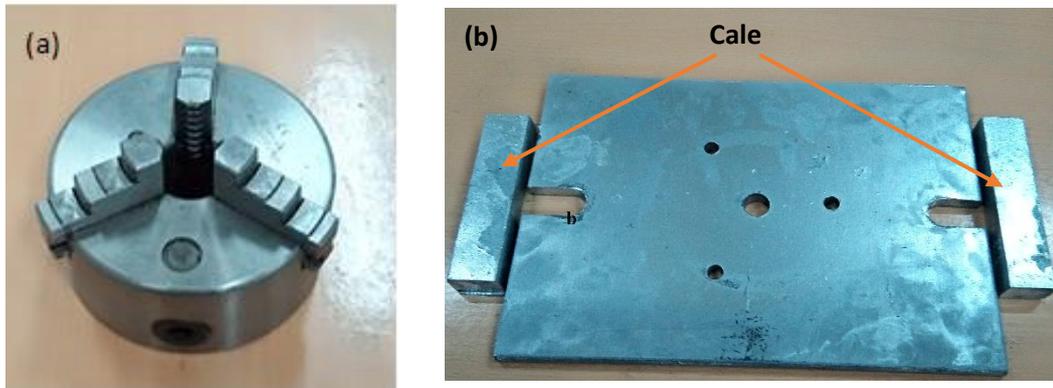
La figure III.4 montre un porte-outil typique d'une fraiseuse. La partie conique est jointe au mandrin de la machine alors que la partie cylindrique, en noir, permet d'accueillir la deuxième pièce (rotation du pièce ).



**Figure III.4 :** Porte outil typique

### III.3.2.2 Mandrin et support mandrin

Le mandrin (figure III.5-a) que nous avons utilisée dans notre étude est un mandrin a trois mors, pour assurer la fixation de la deuxième pièce. Le mandrin est fixé sur la table horizontale du fraiseuse par un support par trois boulons (figure III.5-b).



**Figure III.5 :** (a) Mandrin a trois mors, (b) Support mandrin.

Après le montage des deux systèmes sur une fraiseuse universelle, notre système devenu prêt à faire les essais avec le procédé de soudure par friction rotative figure III.6.



**Figure III.6 :** Système de soudure par friction rotative

### III.4 Mode opératoire

*Cette technique de soudage consiste à fixer verticalement la pièce tournante dans le mandrin rotatif et la pièce immobile dans un système de bridage solidaire à la table de la machine. Avant de souder, il faut que les deux pièces à souder soient positionnées de façon à assurer que les deux axes de rotation soient coaxiaux. Après la mise en rotation de la pièce tournante, cette dernière est accostée progressivement à la pièce immobile afin de mettre en contact les deux pièces sous une force axiale constante. Pendant ce temps, la chaleur à l'interface de contact des deux pièces, produite par la friction, augmente et rends la région de contact sous une forme déformée plastiquement. Après une durée pré réglée (phase de friction et échauffement) la rotation est arrêtée et une force axiale est appliquée sur la pièce mobile pendant un temps pré réglé afin de réaliser la phase de forgeage (phase de soudage). Sous l'influence de la force axiale et la chaleur produite par friction, un joint de soudure se crée à l'interface des deux pièces. En général, le mode opératoire d'une opération de soudage par friction se fait selon les étapes montrées par la figure III.7.*

#### III.4.1 Paramètres du soudage

Le soudage par friction rotation est réalisé sur des barres rondes de diamètre 10 mm et de longueur 80 mm, l'optimisation des paramètres de soudage permet de contrôler la qualité et la morphologie du joint de soudure. Ces principaux paramètres sont les suivants :

- 1- Vitesse de rotation de la pièce mobile 710, 1000, and 1400 tr/min,
- 2- Temps et force de friction 10 s (phase d'échauffement),
- 3- Force de forgeage 13 KN (phase de soudage),
- 4- Les vitesses de déplacement de l'une des barres métalliques sont les suivantes : 20, 40 et 63 mm/min.

On note que l'acier est mis en rotation et qui se déplace vers la barre de cuivre qui est maintenue fixe.

Afin de mettre en évidence l'influence des paramètres opératoires sur la qualité des joints de soudures et de pouvoir fournir des données quantitatives sur les propriétés mécaniques de la soudure qui résulte, le matériau a été soudé avec des paramètres différents à savoir le temps de friction et la force de friction.

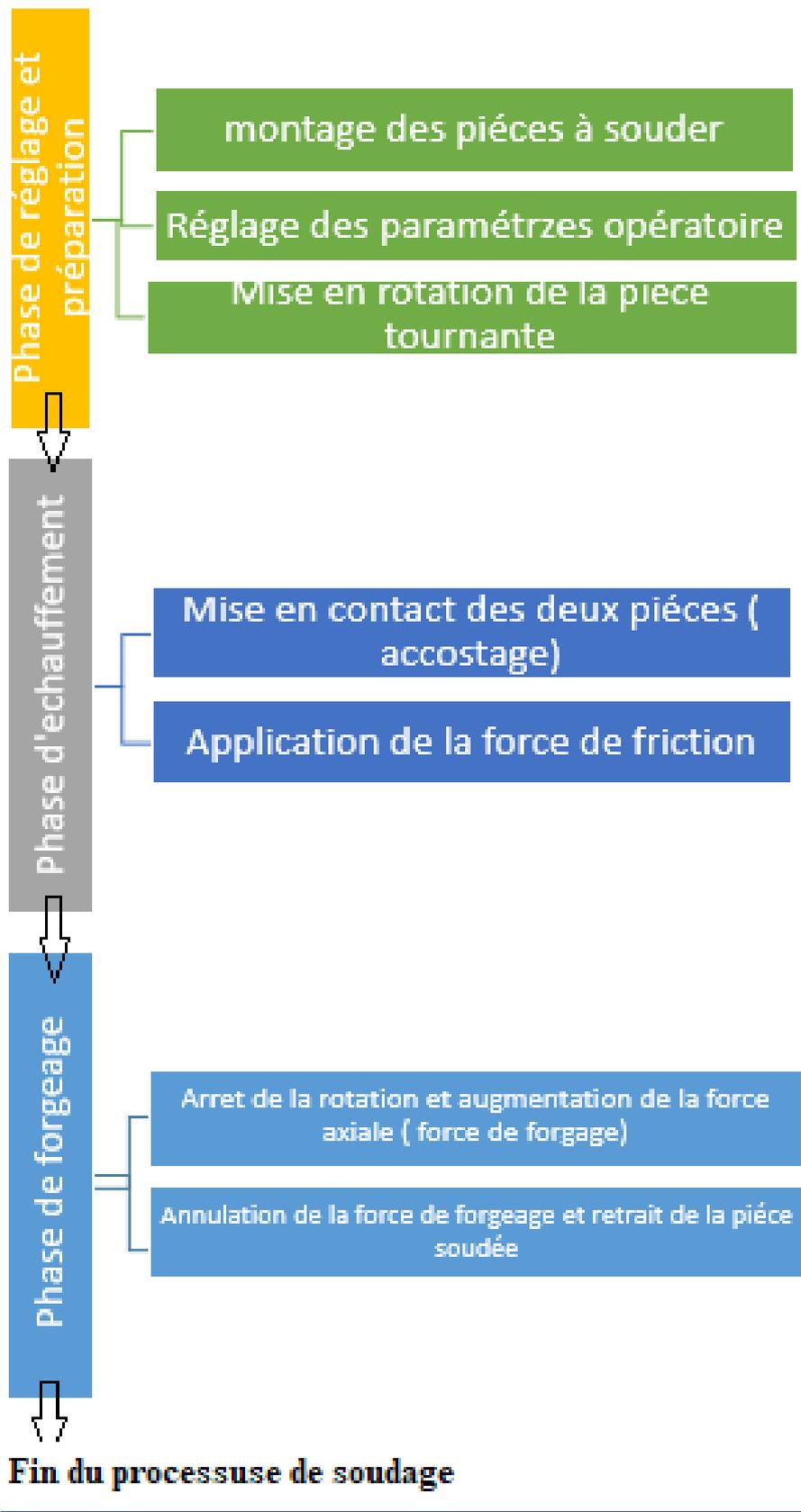


Figure III.7 : Schématisation des différentes étapes du procédé de soudage par friction rotative. [1]

### III.4.2 Expérimentation

Les essais sont menés conformément au plan d'expériences sont consignés de regroupe les paramètres opératoires dans le tableau d'expériences (Tableau III.2).

**Tableau III.2 :** Paramètres opératoires utilisés lors du soudage

Echantillons	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	Temps de friction (s)
<b>E1</b>	710	20	10
<b>E2</b>	//	40	10
<b>E3</b>	//	63	10
<b>E4</b>	1000	20	10
<b>E5</b>	//	40	10
<b>E6</b>	//	63	10
<b>E7</b>	1400	20	10
<b>E8</b>	//	40	10
<b>E9</b>	//	63	10

### III.4.3 Procédure et instruction de soudage :

Les différentes phases d'une opération de soudage se déroulent comme suit :

1. Mis en place et fixation des pièces dans les mandrins.
2. Maintenir la position de levier de vitesse de rotation sur la position choisie.
3. Appuyer sur le bouton **ON** pour démarrer la machine et le bouton **OF** pour arrêter la machine.
4. Ecarté les pièces a soudée entre eux.
5. Mise en marche du moteur, la broche étant débrayée et freinée.
6. Embrayage de la broche et la mise en rotation uniforme de la pièce 1 (figure III.8).
7. Accostage des pièces 1et 2 sous faible effort (F1) (figure III.9).

Pendant cette approche, les pièces viennent en contact par leurs aspérités en formant une surface rigoureusement perpendiculaire à l'axe de rotation, grâce à l'effort ( $F_1$ ), (figure III.9); alors qu'un couple résistant erratique apparaît. Il n'y a pas d'échauffement mais une égalisation mécanique des surfaces et l'apparition progressive du couple de friction.



Figure III.8 : Démarrage du cycle de soudage

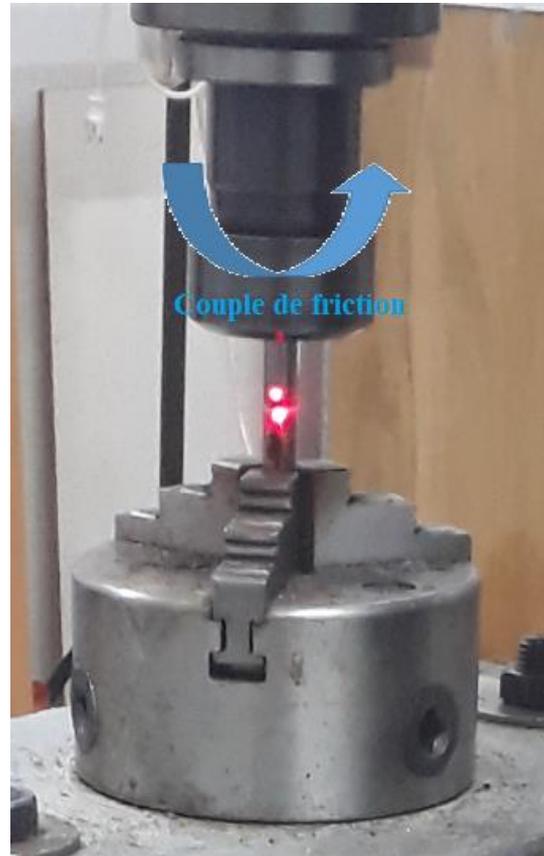
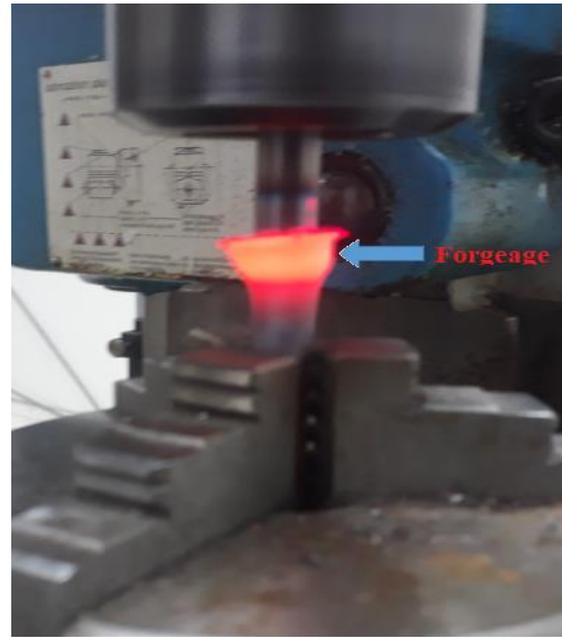


Figure III.9 : Phase d'accostage F1

L'application de l'effort de chauffe ou la conversion de l'énergie mécanique en énergie calorifique (figure III.10) avec apparition du phénomène thermique sous l'effet d'un effort, le frottement intense provoque une élévation de température ; c'est la phase de friction. Ce phénomène est caractérisé par un couple à peu près constant dans un métal normal et en fonction du temps. Ce qui entraîne la formation du bourrelet. La chaleur se diffuse de façon globale et symétrique de part et d'autre part du plan de friction jusqu'à atteindre des conditions favorables au forgeage, La rotation est interrompue.



**Figure III.10 :** Phase d'échauffement



**Figure III.11 :** Phase de forgeage

Le forgeage des pièces à souder est dû par l'application d'un effort, approprié après débrayage et freinage du mandrin tournant (figure III.11). On note que le joint soudé est formé par des bourrelets subits une nouvelle augmentation de volume et se fixe à son état définitif et qui sont dues au procédé de soudage et surtout à la ductilité du cuivre (figure III.12 et III.13).



**Figure III.12 :** Fin de la phase de forgeage



**Figure III.13 :** Pièces après soudage

Une opération d'ébavurage se fait généralement juste à la fin de l'opération de forgeage sur la machine elle-même.

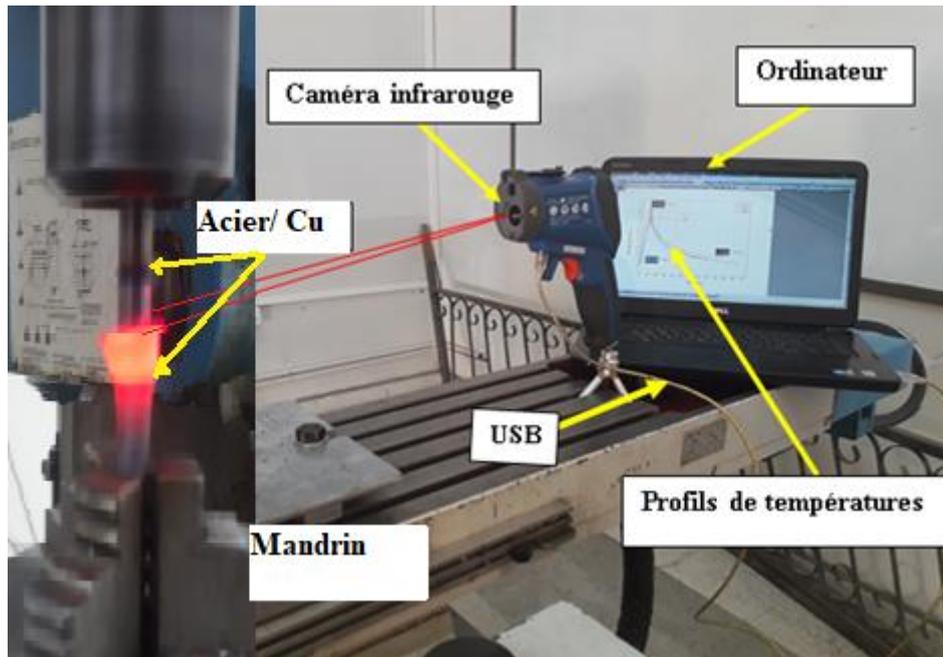
### **III.4.4 Mesures de température par caméra infrarouge**

Une caméra infrarouge a été utilisée pour mettre en évidence les distributions de températures sur les échantillons. Puisqu'aucun dispositif n'entre en contact avec la surface à mesurer.

#### **III.4.4.1 Procédure du mesurer de température par caméra infrarouge**

Pour mesurer les variations de la température du matériau dissemblable acier A60 /Cuivre à souder au cours du temps, il faut suivre les étapes suivantes (figure III.14) :

1. Préparer les échantillons selon les dimensions indiquées précédemment.
2. Fixer le mandrin sur son support, puis fixer le support sur la table horizontale de la fraiseuse.
3. Placer un échantillon (pièce fixe) dans le mandrin, et un autre (pièce en rotation) dans le porte outil.
4. Faire ajuste et centrer les deux pièces de l'acier et cuivre.
5. Installer le système de mesure de pression entre la table et le bloc.
6. Placer la caméra infrarouge en respecte la distance recommandée de mesure.
7. Régler les deux taches lamineuses au niveau de la zone de soudage.
8. Raccorder la caméra à l'ordinateur afin de sauvegarder les variations de la température (points de données).



**Figure III.14 :** Capteur de température à distance de marque Infrared Video Thermometer (IRVT) device (FI 638TI).

### III.5 Techniques de caractérisation microstructurale

#### III.5.1 Préparation métallographique des échantillons

L'examen micrographique a pour but de mettre en évidence la structure des échantillons soudés ont été coupés selon une coupe longitudinale pour effectuer des observations microscopiques (figure III.15). Pour ce faire, une préparation métallographique des échantillons représentatifs pour obtenir une surface polie et plane est nécessaire. Ceci implique un découpage et un polissage.



**Figure III.15 :** Coupes longitudinales des échantillons soudés.

### III.5.2 Analyse chimique

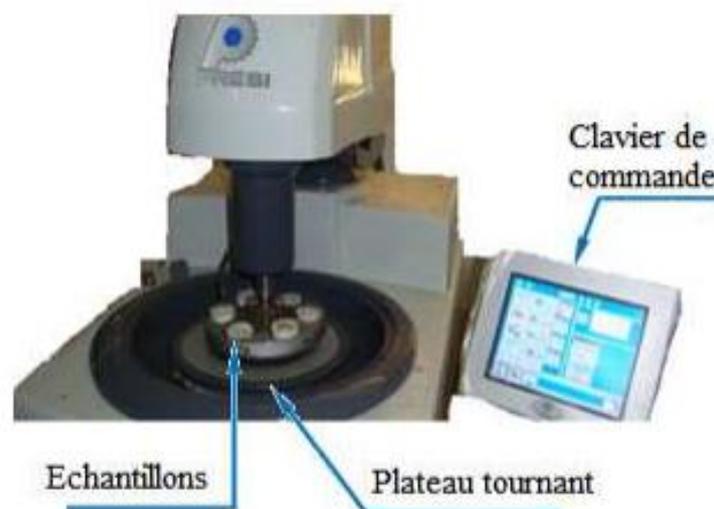
L'analyse chimique des échantillons ont été faites par Spectrométrie à émission optique. L'analyse chimique de chaque métal est présentée dans le tableau III.3.

**Tableau III.3 :** L'analyse chimique du cuivre et de l'acier

Matière	Teneur de l'élément en% massique												
	Fe	Sb	Mo	Cu	Ni	Sn	Mn	Cr	V	Si	P	Al	Zn
Cu	0,071	2,846		97,08	-	0,182	0,331	-	-	0,030	0,008	0,013	0,20
Acier	99,10		0,005	0,044	0,026		0,573	0,048	0,003	0,185	0,008	-	-

### III.5.3 Polissage

Les sections de soudures destinées à l'examen micrographique sont polis sur des feuilles du papier abrasif à base de carbure de silicium de différentes granulométrie de plus en plus fine, jusqu'à une taille de grain de N°5000. Le polissage est effectué à l'aide d'une machine de polissage (figure III.16), afin de garantir l'uniformité du polissage, ce qui facilitera la précision de l'analyse microstructurale. Pour la finition, on a utilisé un polissage à l'alumine. Ce type de polissage consiste à frotter l'échantillon sur un disque de feutre imbibé d'une suspension d'alumine.



**Figure III.16 :** Machine de polissage

## III.6 Techniques d'observation microscopiques

### III.6.1 Observations au microscope optique

L'observation microscopique a été effectuée en utilisant un microscope métallographique de marque ZEISS et de type Nikon ECLIPSE équipé d'un appareil photo numérique reliée à un ordinateur pour l'acquisition des photos prises sur le joint soudé de notre échantillon (Fig.III.17). L'ordinateur contient un logiciel d'analyse d'image « Image & Mesure » et permettant d'obtenir des grossissements variant de 50 à 1000 x. Les surfaces polies des échantillons ont été attaquées par le réactif Nital 3% pour l'acier (A60) et attaquées le cuivre (Cu) par l'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ .



**Figure III.17 :** Microscope métallographique de type Nikon ECLIPSE

### III.6.2 Observations au microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage (MEB) (ou SEM Scanning Electron Microscope) est un appareil, pouvant fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide. Son utilisation est courante en biologie, chimie, métallurgie, médecine, géologie... Les premiers appareils ont été mis au point dans les années 40 mais les premiers appareils commerciaux ont été disponibles vers le milieu des années 60. Généralement, le microscope électronique à balayage est couplé à un système de microanalyse (EDX).

Un MEB utilise un faisceau d'électron à la place des photons utilisés dans un microscope optique. Ceci permet de résoudre les deux inconvénients de la source lumineuse. La longueur d'onde du faisceau électronique est 100000 fois plus faible que celle de la lumière, et d'autre

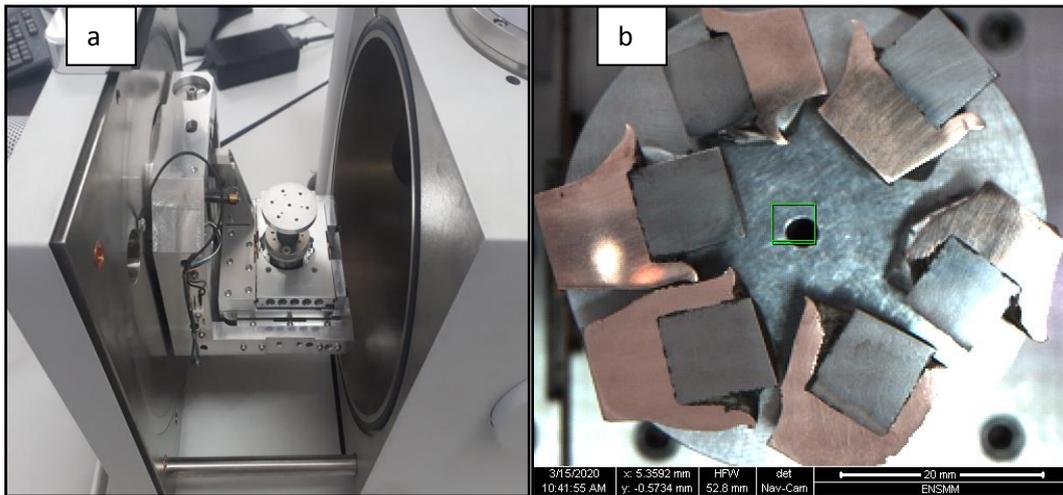
part l'ouverture de ce faisceau est très faible. Il en résulte que les appareils modernes permettent des grossissements jusqu'à 100 000 fois sur la plupart des matériaux solides tout en conservant une profondeur de champ compatible avec l'observation de surfaces tourmentées.

Les différents MEB utilisés sont équipés de détecteurs d'électrons secondaires (SE) pour observer la topographie des échantillons et rétrodiffusés (BSE) pour déterminer les différentes phases en fonction de leur contraste. Les analyses qualitatives et semi quantitatives ont nécessité l'utilisation d'un spectromètre EDS. L'échantillon est bombardé par le faisceau d'électrons d'énergie de 20keV. L'impact provoque l'émission de rayons X caractéristiques des éléments constituant l'échantillon. Pour notre travail de recherche ; un microscope électronique à balayage a été utilisé de marque PHILIPS / FEI QUANTA 250 et qui est équipé par l'EDS pour l'analyse chimique (Fig.III.18).



**Figure III.18 :** Microscope électronique à balayage de marque PHILIPS / FEI QUANTA 250.

On note que la chambre de ce MEB (Fig. III.19a) permet d'accueillir en même temps un nombre important d'échantillons (Fig. III.19b).



**Figure III.19** : Chambre du microscope électronique à balayage et la disposition de plusieurs échantillons à analyser.

## III.7 Caractérisation mécanique

### III.7.1 Essais de traction

L'essai de traction sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Les essais de traction ont été effectués selon la norme ISO 6892-1 : 2016 Matériaux métalliques Essai de traction à température ambiante ISO 6507-1 matériaux métallique. Une machine universelle de traction de marque ZWICK 1476 100KN a été utilisée (Fig.III.20). La longueur de l'éprouvette est 150 mm.



**Figure III.20** : Machine universelle de traction de marque ZWICK 1476 100KN.

### III.7.2 Mesures de dureté Vickers

La dureté d'un matériau est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur. Ces corps durs appelés pénétrateurs ont des formes de pointe différentes telles que la pyramide à base carrée pour la microdureté Vickers ou une bille pour la microdureté Brinell ou Meyer. Le principe de mesure de dureté est basé sur le principe d'une pression en d'autres termes : l'application d'une force  $F$  (charge) sur une surface plane  $S$  d'un échantillon. Il est nécessaire d'avoir une épaisseur suffisante, au moins huit fois la profondeur  $h$ , afin que la pénétration ne déforme le matériau. La dureté est définie comme étant :

$$H = F/S$$

Le pénétrateur du microduromètre Vickers est une pyramide à base carrée d'angle au sommet égal à  $136^\circ$ , la forme de l'empreinte est donc de forme carrée. Nous mesurons les deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  qui seront utilisées dans le calcul de la dureté. La dureté Vickers  $H_v$  est donnée par les relations suivantes :

$$H_v = 1.854. P/d^2 \quad [P \text{ en Kgf}]$$

$$H_v = 1.189.P/d^2 \quad [P \text{ en N}]$$

Toutes les mesures de microdureté dans les joints soudés étudiés dans ce travail sont effectuées avec un microduromètre de type: Matsuzawa MXT 70 (figure III.21), en appliquant une charge 300 gf pendant 15 s.



**Figure III. 21** : Microduromètre Vickers de type: Matsuzawa MXT 70

## **Bibliographie**

[1] M. Demouche, Etude de l'influence des paramètres de soudage par friction sur la qualité des joints soudés, Date de publication. 10-feb-2020.

## Chapitre IV.

## Résultats et discussions

## IV.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré aux différents résultats de caractérisation effectuée sur les échantillons soudés par friction rotation de barres d'acier avec des barres en cuivre sous plusieurs conditions de soudage. Notre étude expérimentale est basée sur les objectifs suivants :

- Les mesures quantitatives des différents paramètres du processus : vitesse de rotation, vitesse d'avance, temps, variation de longueur.
- Les mesures des variations de la température
- L'évaluation des propriétés mécaniques des joints par essai traction.

## IV.2 Paramètres de soudage

Avant d'entamer le soudage, deux séries des échantillons ont été préparés : la première série est désignée pour les essais de traction, et la deuxième pour l'observation microstructurales. Les mesures de la température ont effectuées au cours de l'opération de soudage.

Le tableau suivant indique les paramètres de soudage étudié dans notre étude.

**Tableau VI.1** : Paramètres de soudage étudié.

N°	Vitesse de rotation $\omega$ (tr/min)	Vitesse d'avance va (mm/s)	Temps $t_1$ (s)	Temps total (s)	Variation de Longueur $\Delta L$ (mm)
1	710	20	20	40	5.4
2	1000	20	20	40	6.2
3	1400	20	20	40	6.3
4	710	40	20	40	8.8
5	1000	40	20	40	5.2
6	1400	40	20	40	11.2
7	710	63	20	40	10.8
8	1000	63	20	40	10
9	1400	63	20	40	14.2

### IV.2.1 Mesure les variations de la longueur des échantillons

L'effet de la vitesse de rotation sur les variations de la longueur des échantillons, avant et après le soudage, est illustré dans la figure IV.1.

Lorsque la vitesse de rotation augmente, en raison de la génération de chaleur plus élevée, plus de ramollissement du matériau se produit et un plus petit flash est formé par le processus d'extrusion sous le mouvement.

La figure IV.1 montre que la variation de longueur est plus élevée à 1400 tr/min à une vitesse d'avance 63mm/s, par rapport à la vitesse de rotation 1000 et 710 tr/min, donc parmi les trois paramètres étudiés, le meilleur résultat trouvé à la vitesse 1400 tr/min (échantillon 3).

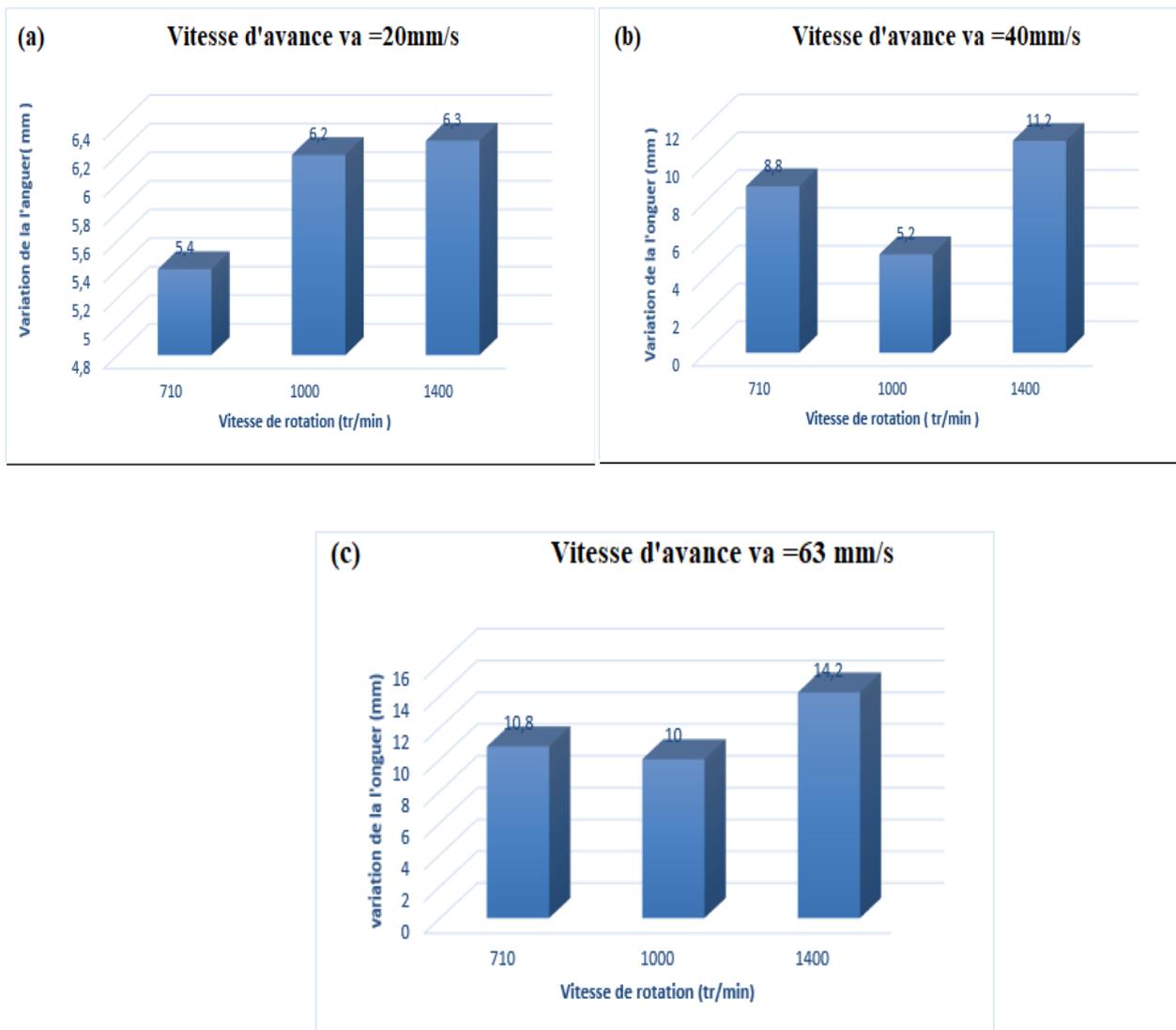


Figure IV.1 (a .b.c) : Effets de la vitesse de rotation sur la variation de la longueur de L'échantillon.

### IV.3 Etude thermique du joint soudé

#### IV.3.1 Mesure de température

Le processus de soudage par friction a été initialement effectué en variant deux différents paramètres :

1. Vitesse de rotation : 710 ,1000 et 1400 tr/min.
2. Vitesse d'avance : 20 ,40 et 63 mm/s

Il est important de mentionner que lors du soudage par friction rotative, une chaleur se dégage lors de ce procédé et surtout dans la zone de contact des deux métaux dissemblables.

C'est pourquoi, nous avons essayé de mesurer la température du joint soudé pour les différentes conditions de soudage par friction rotation.

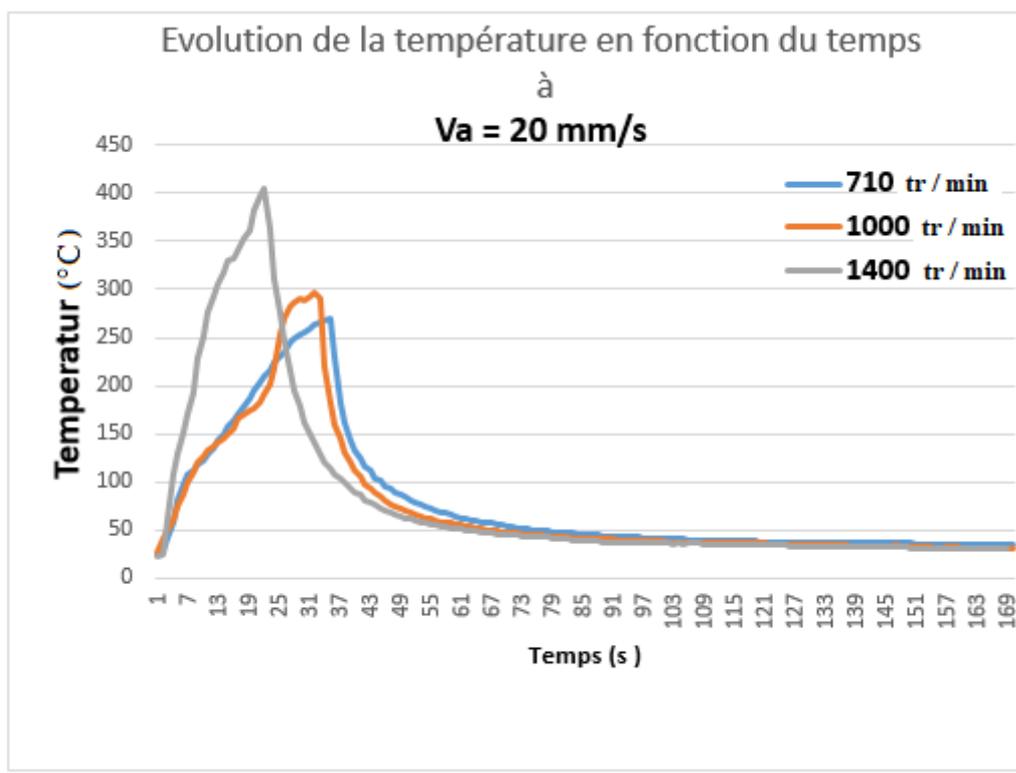
**Tableau VI-2** : les valeurs de température max obtenir en cours de soudage.

N°	Vitesse de rotation $\omega$ (tr/min)	Vitesse d'avance $v_a$ (mm/s)	Temps $t_1$ (s)	Temps total (s)	Température max (°C)
1	710	20	20	40	270.5
2	1000	20	20	40	291.1
3	1400	20	20	40	405.8
4	710	40	20	40	335.2
5	1000	40	20	40	385.1
6	1400	40	20	40	422.1
7	710	63	20	40	329.5
8	1000	63	20	40	411.2
9	1400	63	20	40	448.1

Dans cette partie d'étude, nous présentons les mesures de températures effectuées pendant le procédé de soudage pour trois valeurs de vitesse de rotation 710, 1000 et 1400 tr/min

et sous l'action des vitesses d'avance constante 20, 40, et 63 mm/s. La figure IV.2 (a,b,c) montre la variation de la température au centre du joint soudé en fonction du temps de soudage et de la vitesse de rotation lors du soudage. Cette partie de travail a été effectuée pour les trois vitesses d'avance. On remarque sur ce figure que la température atteinte ses valeurs maximales 405.8, 422.1 et 448.1 °C dans la deuxième phase (phase de forgeage). On constate que la température augmente rapidement jusqu'à une température maximale moyenne de 400 °C pendant les premières 20 secondes de frottement puis elle diminue progressivement et lentement jusqu'à l'ambiante pendant 80 secondes.

- On a noté aussi que, plus la vitesse d'avance augmente, la température du joint augmente jusqu'à la température de 450 °C.
- Dans ce genre de procédé de soudage, un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique.



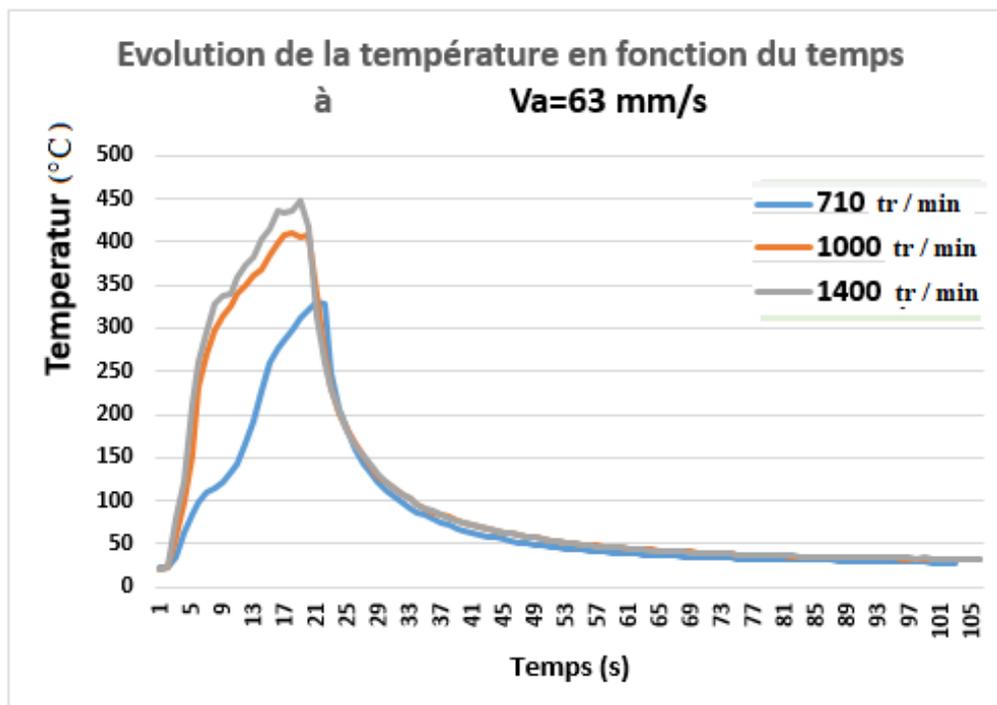
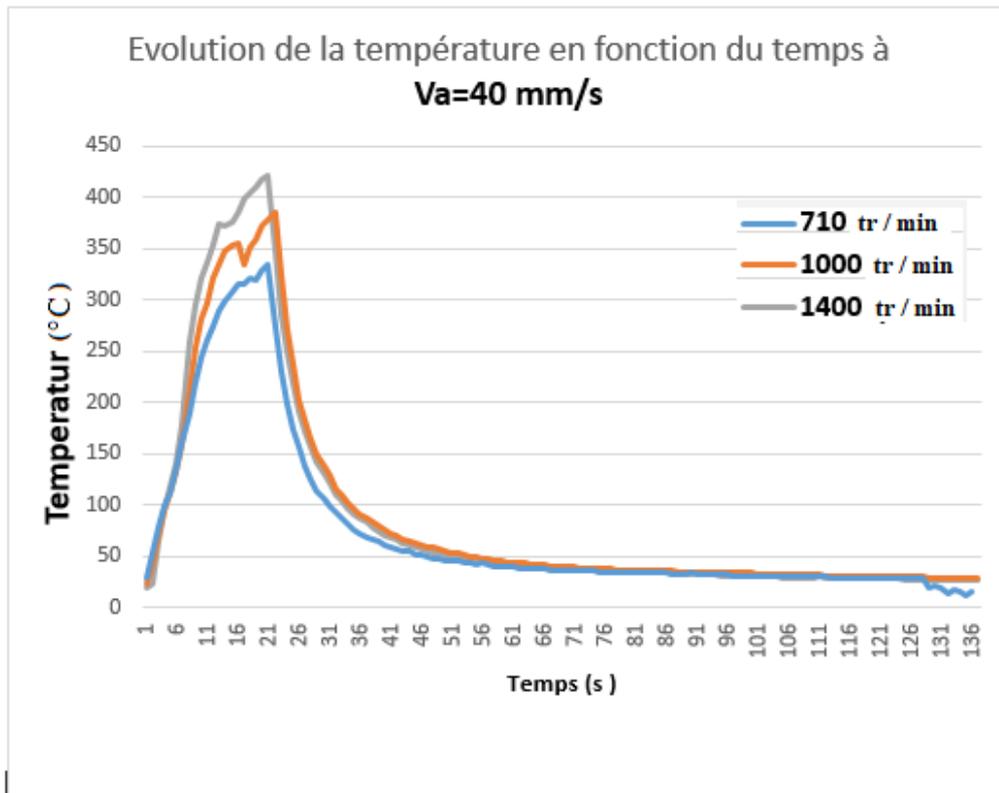


Figure IV.2 : Variation de la température au centre du joint soudé en fonction du temps de soudage et de la vitesse de rotation lors du soudage pour les trois vitesses d'avance  $V_a$ .

## IV.4 Observations microstructurales des joints soudés

L'observation par la microscopie optique d'une section transversale d'assemblage deux matériaux dissemblables d'un acier A60 avec cuivre Cu.

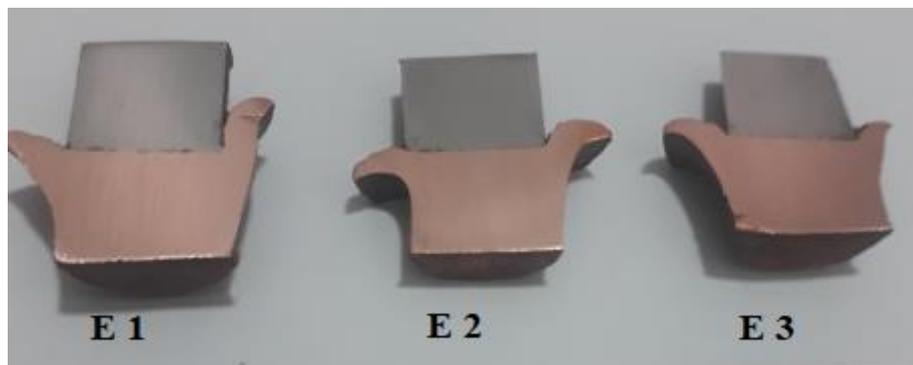
Dans cette partie d'étude des micrographies optiques ont été réalisées sur les différents joints soudés obtenus avec le changement de deux paramètres essentiels : Vitesse de rotation et vitesse de déplacement de l'un des barres (acier).

Les évolutions structurales et les transformations de phases que subit le matériau pendant ce procédé de soudage jouent un rôle important pour les propriétés mécaniques des pièces soudées. Dans le but d'identifier et d'analyser les différentes phases, nous avons effectué une analyse microstructural dans la zone affectée thermomécaniquement et dans la ZAT des cordons de soudure soumis au procédé de soudage par friction rotative pour différents paramètres de soudage. Pour ce faire, plusieurs techniques de caractérisation se sont avérées nécessaires telles que la micrographie optique, l'analyse MEB-EDX.

### IV.4.1 Microscopie optique des joints soudés

Comme la température de soudage est régie principalement par les paramètres de soudage, la variation de ces derniers conduit à un changement de la morphologie et la microstructure des joints de soudure.

L'observation visuelle de la morphologie des joints montre que les joints ont une forme convexe, c'est-à-dire la forme est plus bombée vers le côté de la partie fixe (Figure IV.3). De même, l'étendu de la zone soudée à la région périphérique est plus large par rapport à la région centrale. Cette observation montre que les conditions qui conduisent à la formation de la zone de soudure sont atteintes dans les mêmes conditions lorsque les paramètres considérés se changent.



**Figure IV.3 :** *Photos illustrant trois sections prélevées dans des soudures par friction réalisées sous différentes conditions*

#### **IV.4.2 Zones caractéristiques d'un joint de soudure par friction**

Le procédé de soudage par friction rotative peut être décrit physiquement par une déformation plastique localisée à haute température, suivie d'un refroidissement à l'air libre. Ce phénomène thermomécanique détermine les évolutions de structure métallographique du joint soudé, qui est souvent différente de celle du métal de base. La micrographie optique d'un joint soudé par friction permet de distinguer trois zones principales (figure IV.6). Les emplacements de ces régions ont été approximativement connus en fonction du contraste observé. La morphologie et la microstructure de ces zones dépendent du type du matériau, des géométries de surface d'interface de contact et des paramètres opératoires du processus de soudage.

##### **IV.4.2.1 Zone affectée thermomécaniquement (ZATM)**

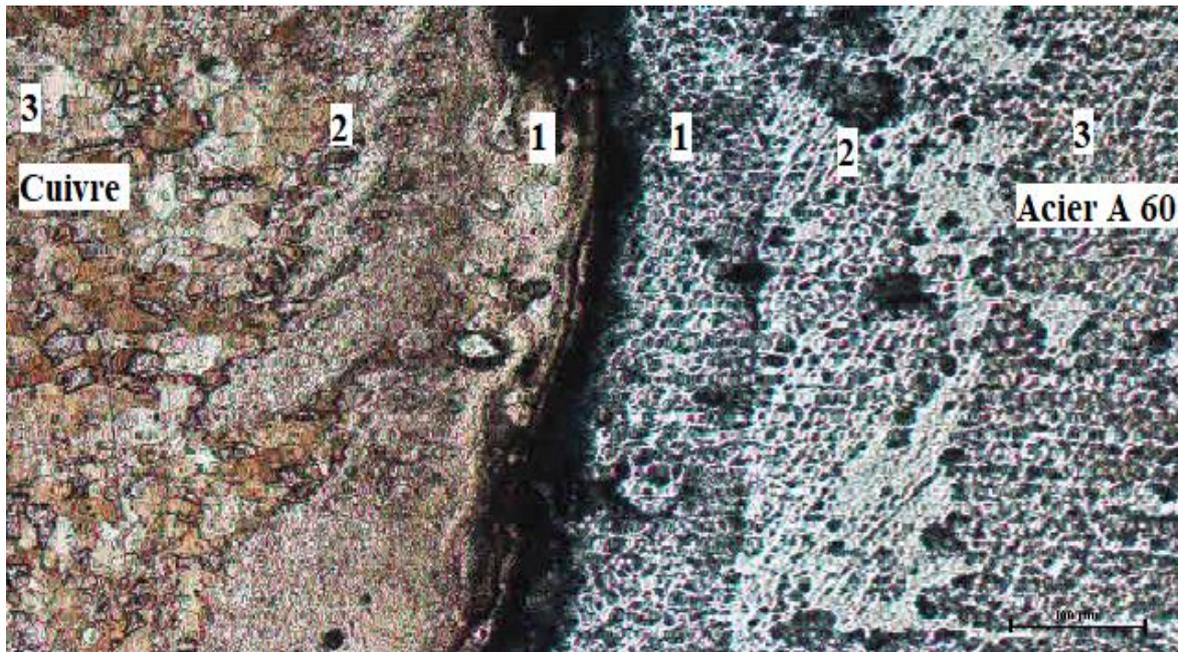
Au centre du joint soudé (zone blanche) se trouve la zone affectée thermomécaniquement (ZATM) (figure IV.4, zone 1). C'est celle qui a subi de grande déformation plastique à haute température. La température atteinte est inférieure à la température de fusion. La largeur de cette zone est plus large à la périphérie par rapport à la zone centrale.

##### **IV.4.2.2 Zone affectée thermiquement (ZAT)**

Au-delà de la zone du centre, le métal de base, qui n'a pas subi de déformations mécaniques, mais a subi le cycle thermique du soudage, se manifeste par des modifications structurales par rapport à son état initial dans une zone qui est la zone affectée thermiquement (ZAT) (figure IV.4, zone 2).

##### **IV.4.2.3 Zone non affectée**

Au-delà de la zone affectée thermiquement se trouve le métal de base (MB) non affecté par le soudage, (figure IV.4, zone 3).



**Figure IV.4 :** Micrographie optique montrant le changement de la microstructure à travers une soudure par friction d'un acier A 60 Attaque Nital 3 % et cuivre Cu Attaque  $HNO_3$ , 1- ZATM, 2- ZAT, 3- Métal de base, g 100 X

## IV.5 Etude de la zone affectée thermomécaniquement

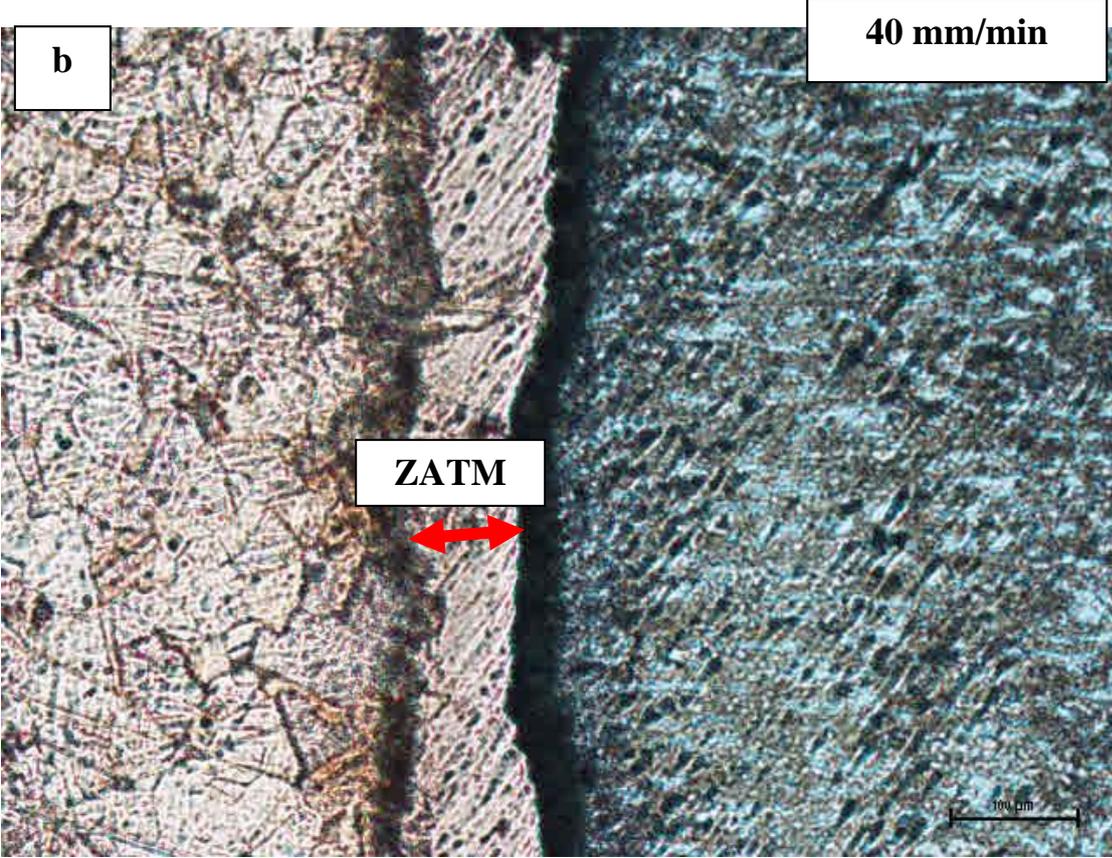
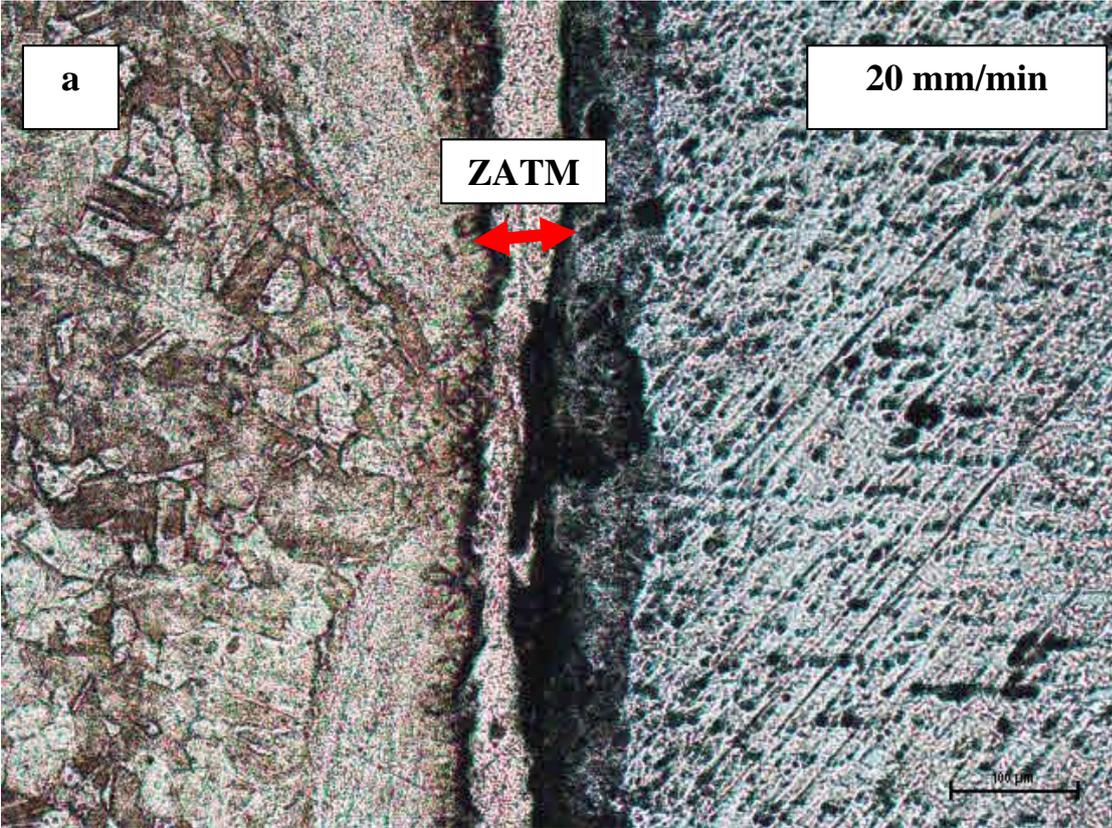
Après attaque métallographique avec le réactif Nital 3 % pour l'Acier A60 et Acide nitrique  $HNO_3$  pour le cuivre Cu, Les cordons de soudure ont été examinés en microscopie optique et électronique, analysés par EDX, La figure IV.4 montre la micrographie d'une section transversale d'assemblage de cuivre et d'acier.

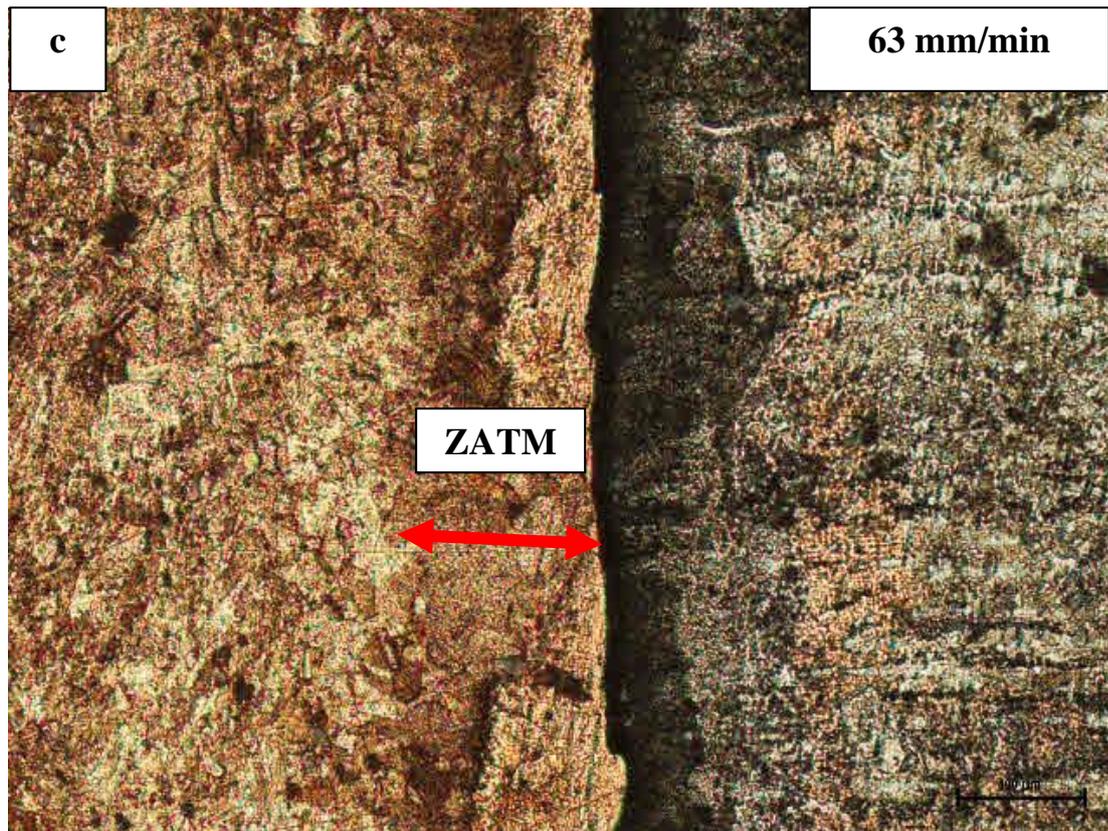
Il est clair que toute la déformation et la transformation pendant le processus de soudage se produisent sur le côté en cuivre, parce que le cuivre est un matériau plus doux que l'acier.

### IV.5.1. Vitesse de rotation 700 tr/min

Pour une vitesse de déplacement croissante et sous une vitesse de rotation constante (700 tr/min), l'observation microstructurale montre l'effet de changement de vitesse de déplacement affecte la microstructure de la zone centrale du joint soudé. On constate que la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) change de taille, car elle augmente avec l'augmentation de la vitesse de déplacement comme indiqué dans la figure IV.5.

On note que cette même microstructure a été observée par Anathapad et al [1].

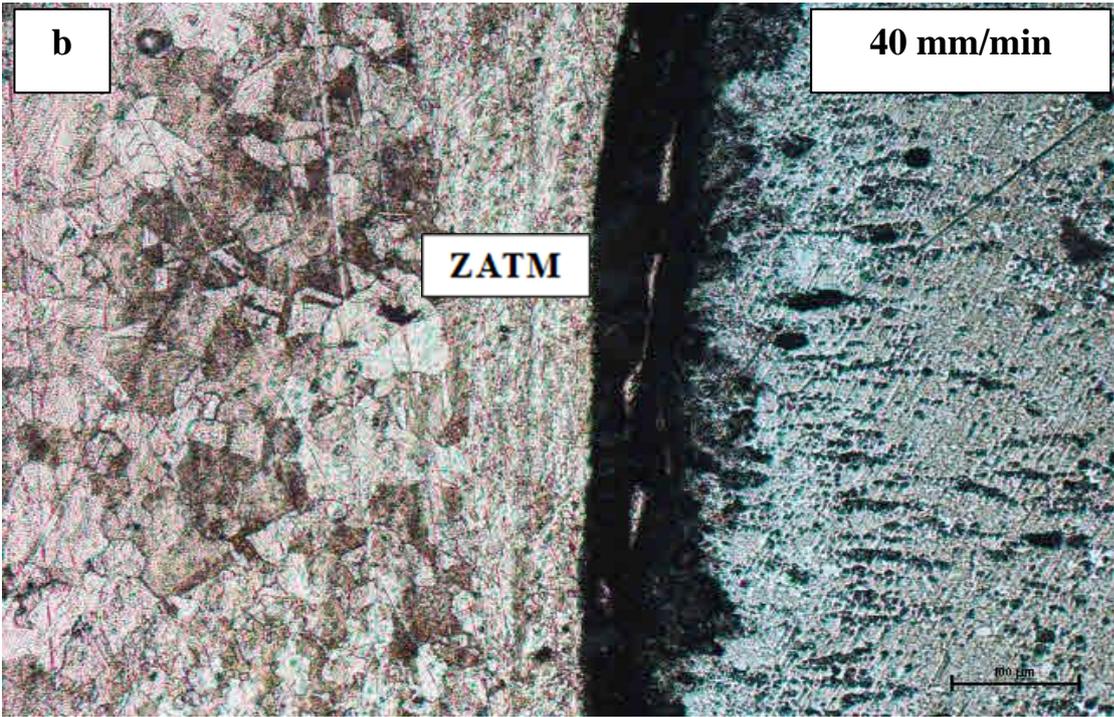
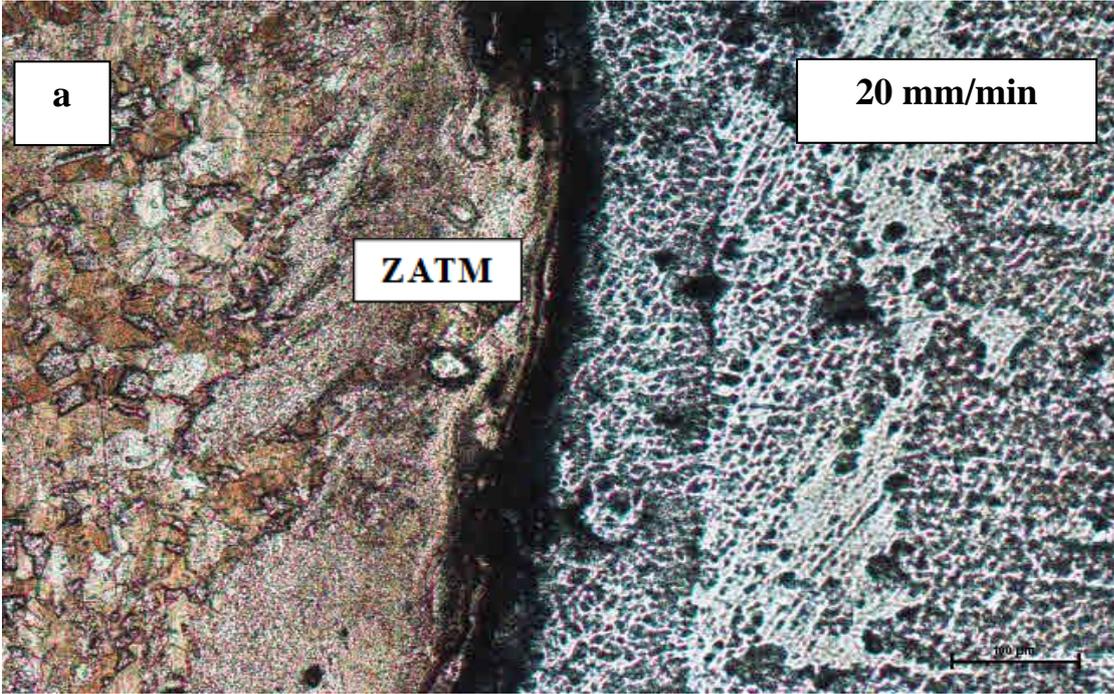


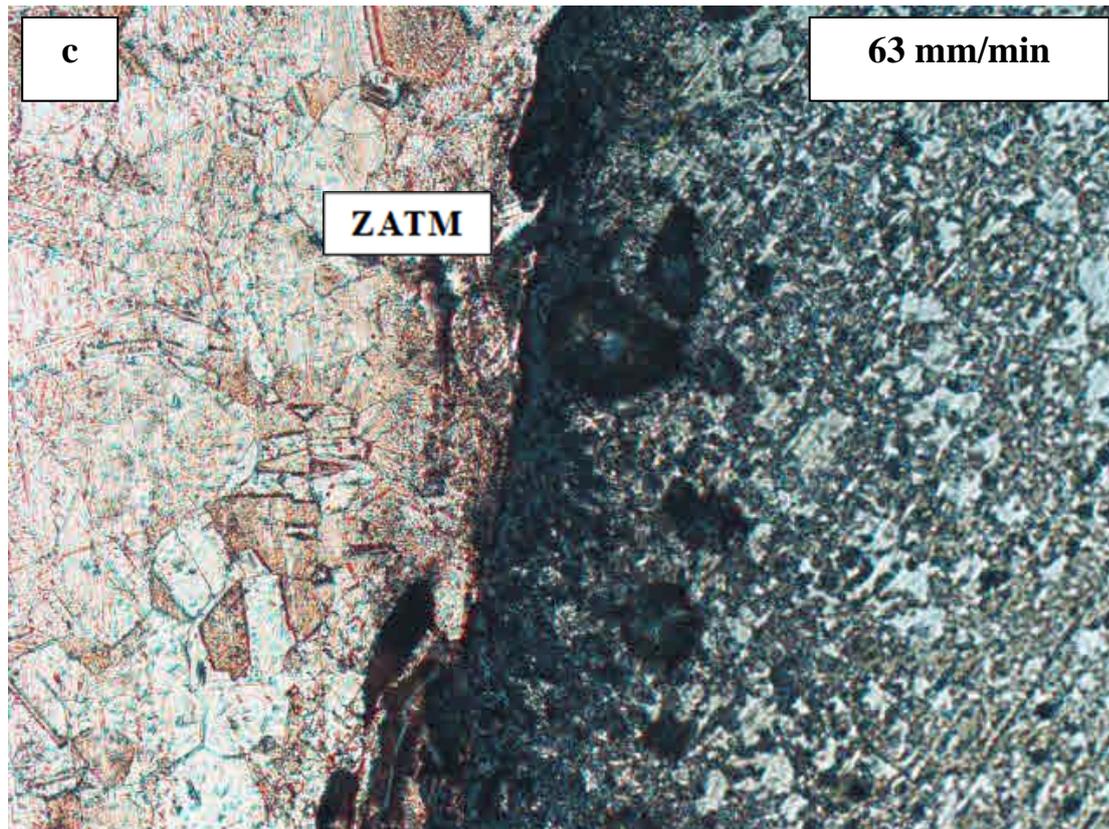


**Figure IV.5 :** *Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 700 tr/min*

#### IV.5.2. Vitesse de rotation 1000 tr/min

Pour vitesse de déplacement croissante et sous une vitesse de rotation constante (1000 tr/min), l'observation microstructurale montre l'effet de changement de vitesse de déplacement affecte la microstructure de la zone centrale du joint soudé. On constate que la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) change de taille mais d'une manière non régulière.



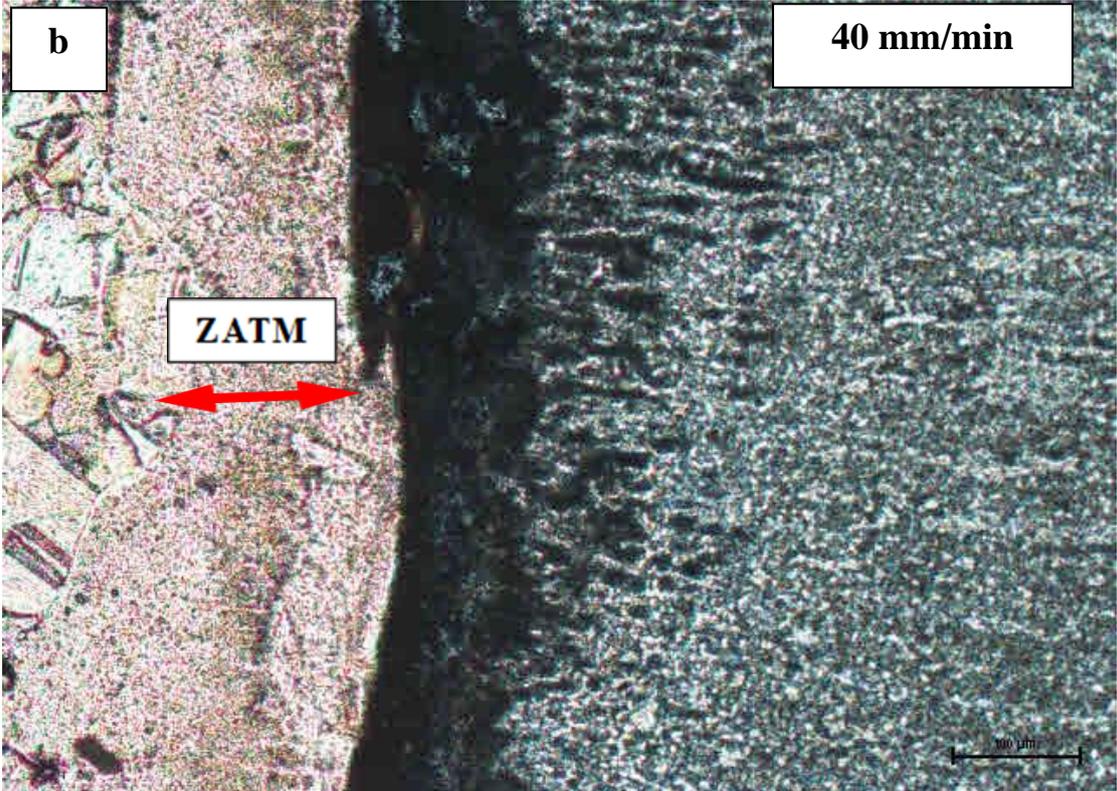
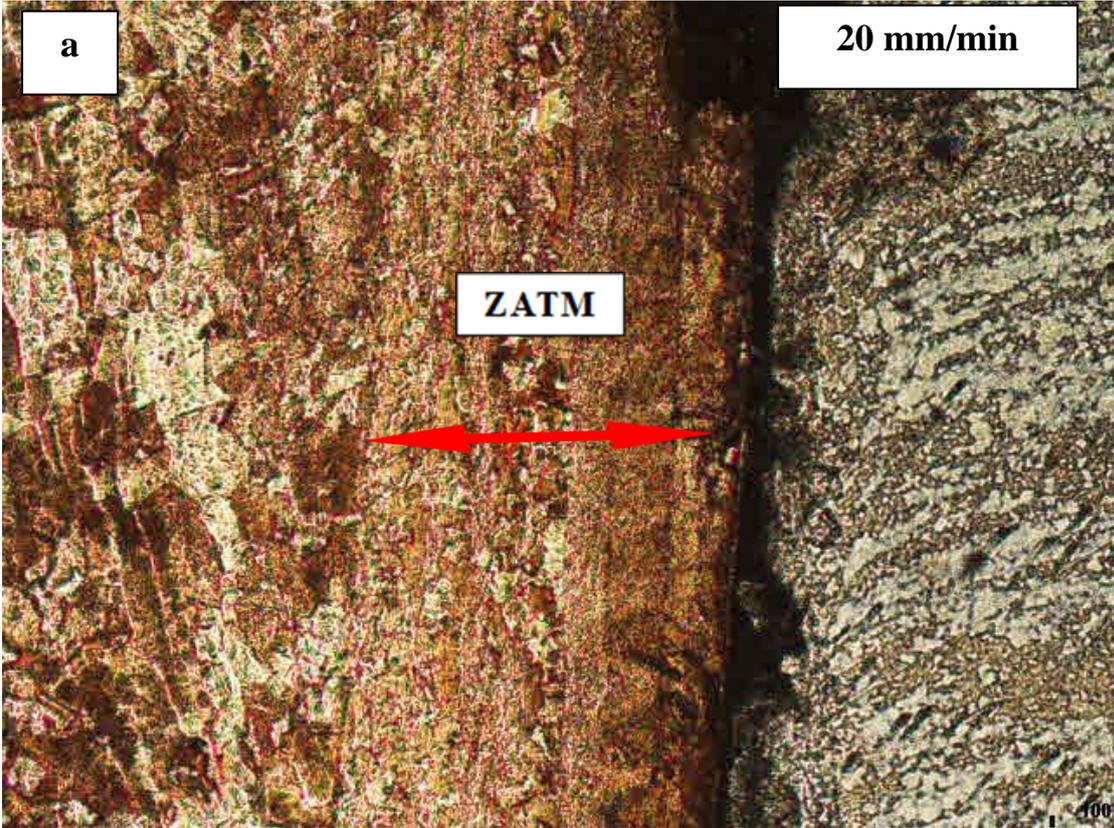


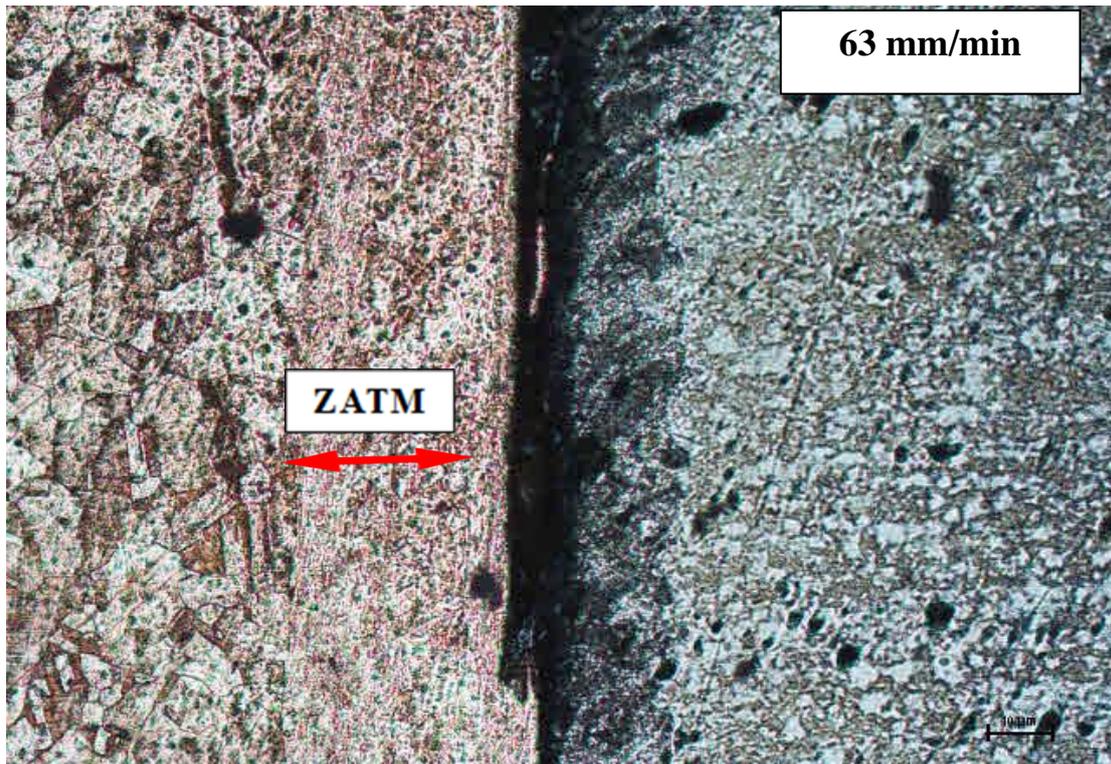
**Figure IV.6 :** *Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1000 tr/min*

#### IV.5.3. Vitesse de rotation 1400 tr/min

Pour une vitesse de déplacement croissante et sous une vitesse de rotation constante et un peu plus grande ( 700 et 1400 tr/min ) par rapport aux deux premières vitesses de rotation (1000 tr/min ), l'observation microstructurale montre l'effet de changement de vitesse de déplacement affecte la microstructure de la zone centrale du joint soudé et surtout la partie acier. On constate aussi que la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) du côté cuivre est plus grande par rapport aux cas des deux premières vitesses de rotation (1000 tr/min). Ce résultat montre l'effet de la vitesse de déplacement sur le comportement microstructural du joint soudé des deux barres (cuivre et acier).

La couche centrale du joint soudé est généralement est la zone de formation de l'interface intermétallique qui est responsable de la fragilité du joints soudé, comme il a été mentionné par Sahin [2].

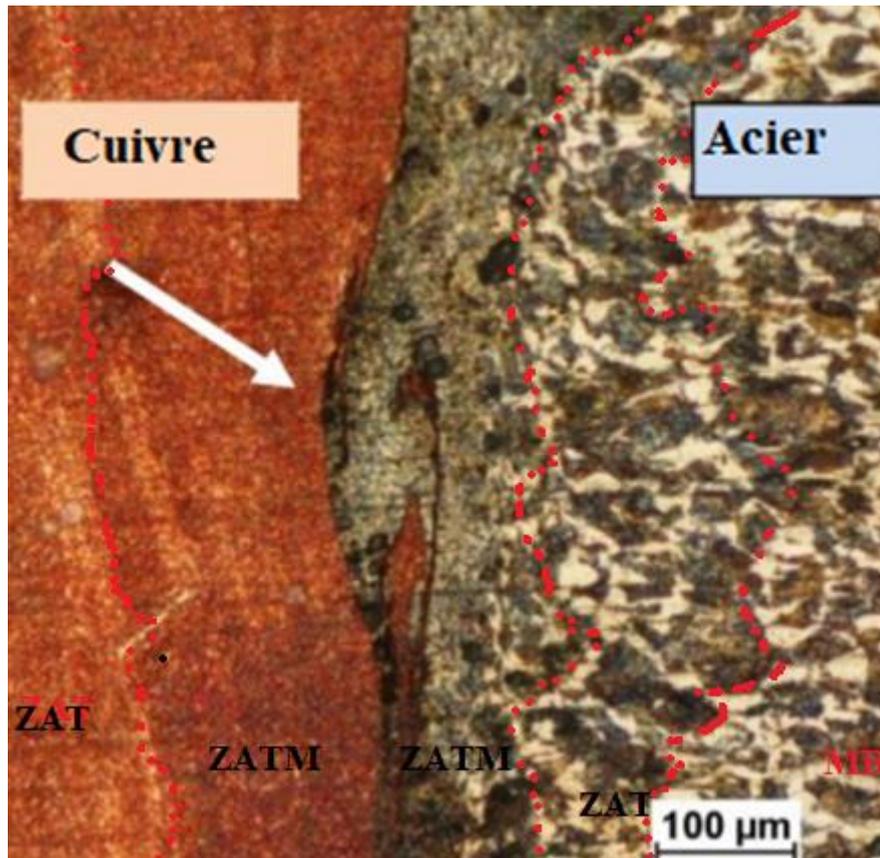




**Figure IV.7 :** *Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1400 tr/min*

Pour donner plus de détails dans la région soudée, la figure IV.8 présente un grossissement de la région. Cette région présente trois zones distinctes, à savoir le métal de base (MB), la zone affectée par la chaleur (ZAT) et elle est limitée par la zone affectée thermo-mécaniquement qui subit une élévation de température, La taille de zone affectée thermiquement (ZAT) est également affectée par le changement de la vitesse de rotation. Toutefois, certaines régions sélectionnées dans les zones de soudure révèlent l'incorporation des deux matériaux dissemblables dans chaque autre comme indiqué par une flèche dans la figure IV.8. Ce L'incorporation est principalement due à la ductilité du cuivre par rapport à l'acier, ce qui reflète la bonne soudabilité du joint Acier / Cuivre. Cette incorporation peut être expliquée par des fragments d'acier dans le cuivre.

L'historique thermique de cette zone affecte la taille des grains, on assiste à un léger grossissement de la taille des grains dans cette zone comme le montre la figure IV.8. La zone thermo mécaniquement affectée (ZATM) se trouve autour du joint soudé. Elle subit de grandes déformations qui provoquent la croissance des grains.



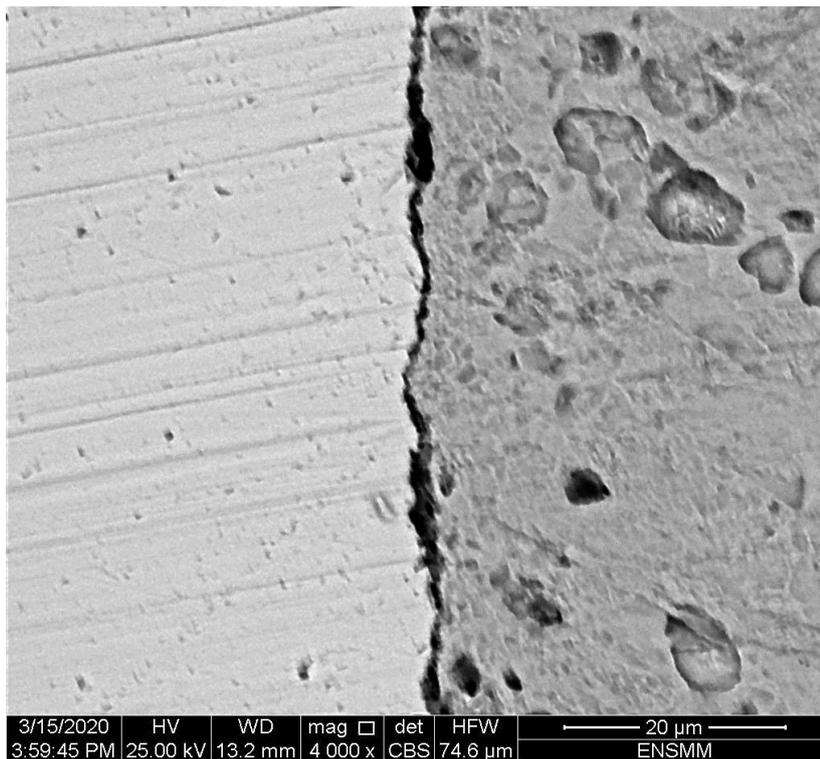
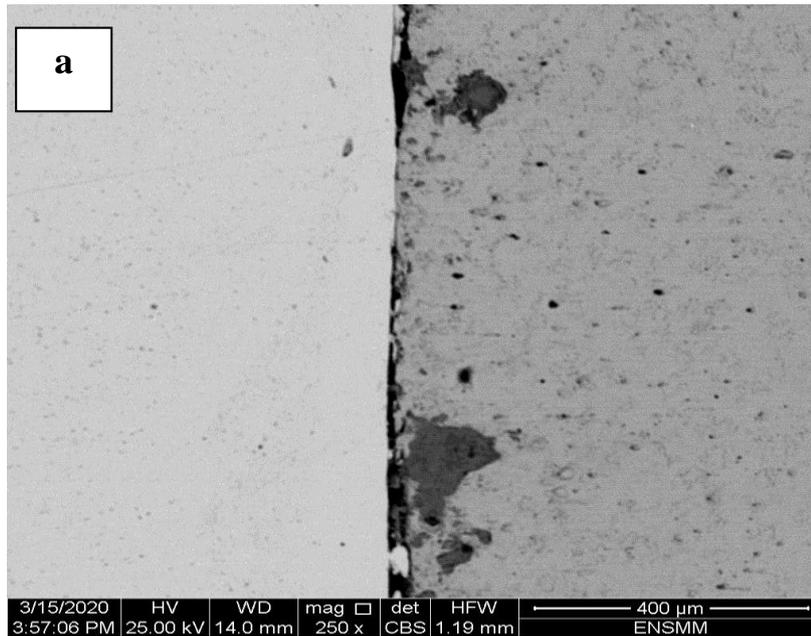
**Figure IV.8 :** Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1400 tr/min et vitesse d'avance 63mm/min

#### IV.6. Microscopie électronique à balayage des joints soudés

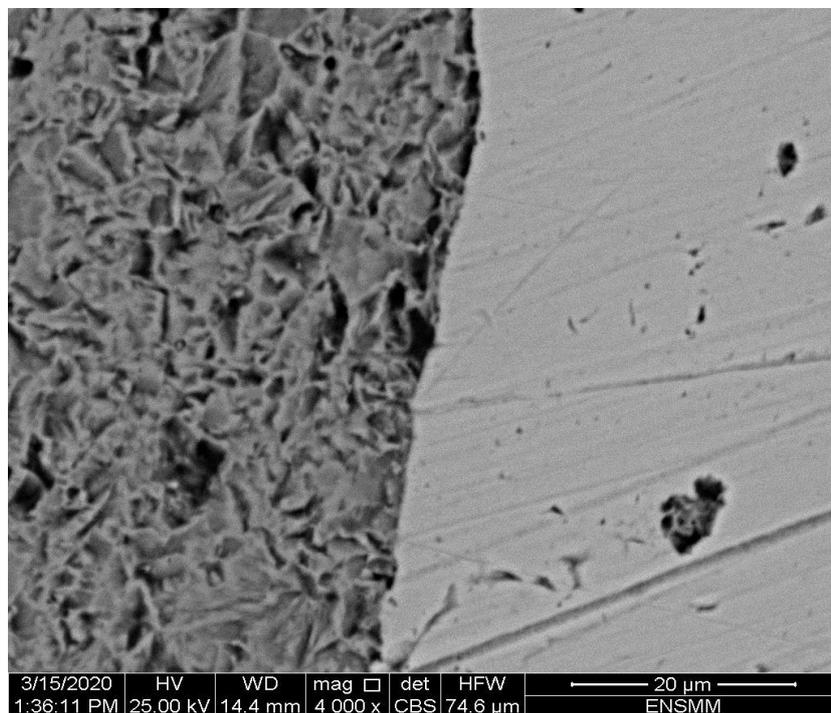
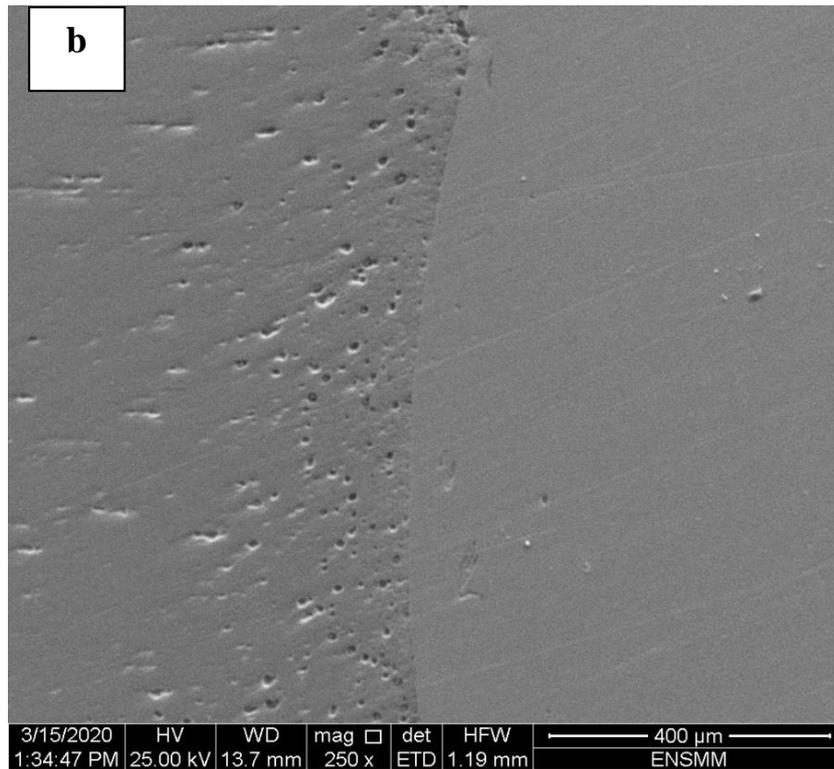
La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) associée à la microanalyse par (EDS) permet une analyse locale des matériaux. Le MEB produit des images tridimensionnelles de la surface des échantillons avec une très grande résolution pouvant atteindre quelques nm. La figure IV.9 présente des micrographies au MEB de la ZATM prélevées dans des éprouvettes soudées dans différentes conditions.

Dans cette partie d'étude, on présente les résultats de l'observation au microscope électronique à balayage des joints soudés sous plusieurs vitesses de rotation (700,1000 et 1400 tr/min) dans la figure IV.9. (a,b,e,c). A travers ces microstructures MEB, lorsqu'on augmente la vitesse de rotation jusqu'à 1400 tr/min on a pu constater la bonne soudabilité des deux barres, car il est rare d'observer des vides dans l'interface de contact *et la zone affectée thermiquement (HAZ) était petit (Figure IV .9).*

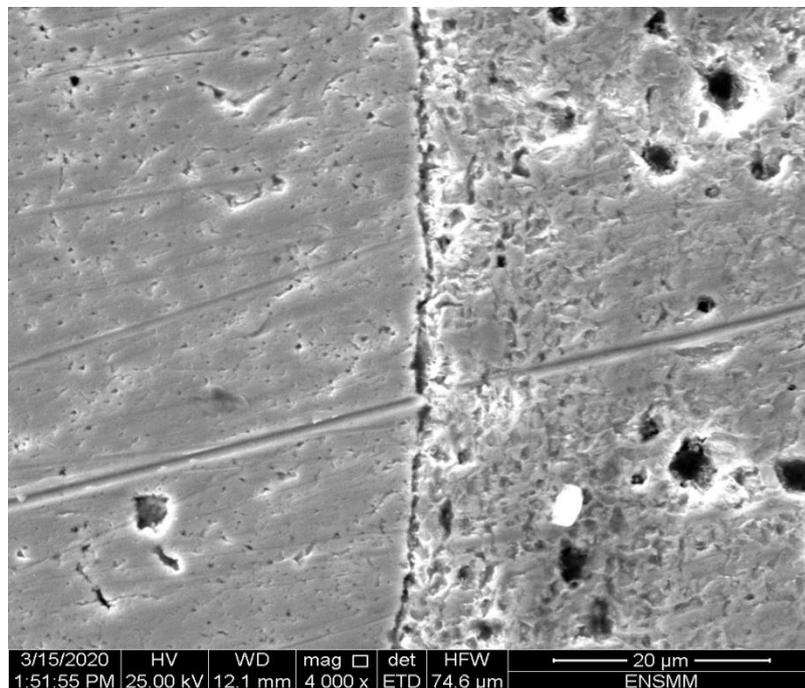
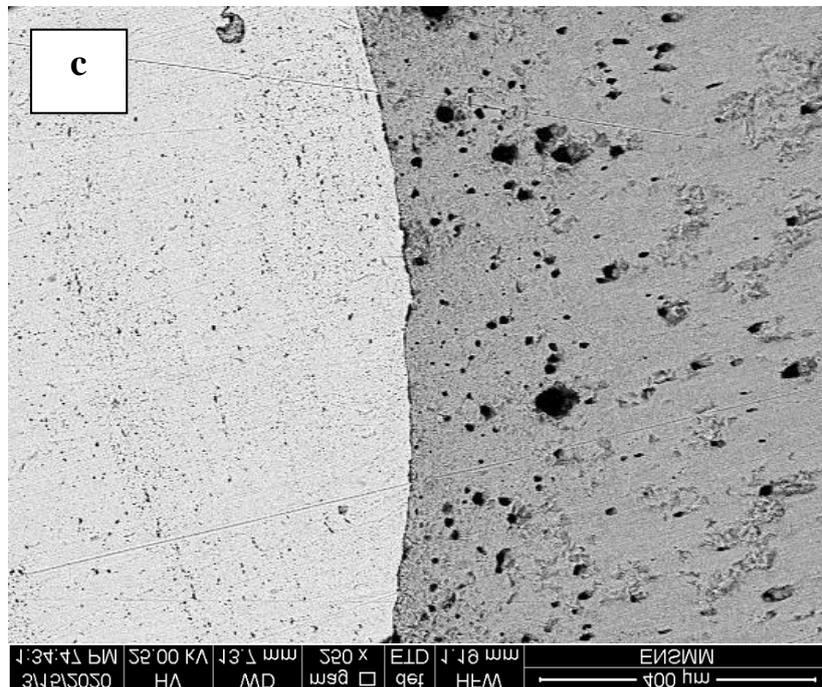
IV.5.1. Vitesse de rotation 700 tr/min



IV.5.2. Vitesse de rotation 1000 tr/min



## IV.6.3. Vitesse de rotation 1400 tr/min

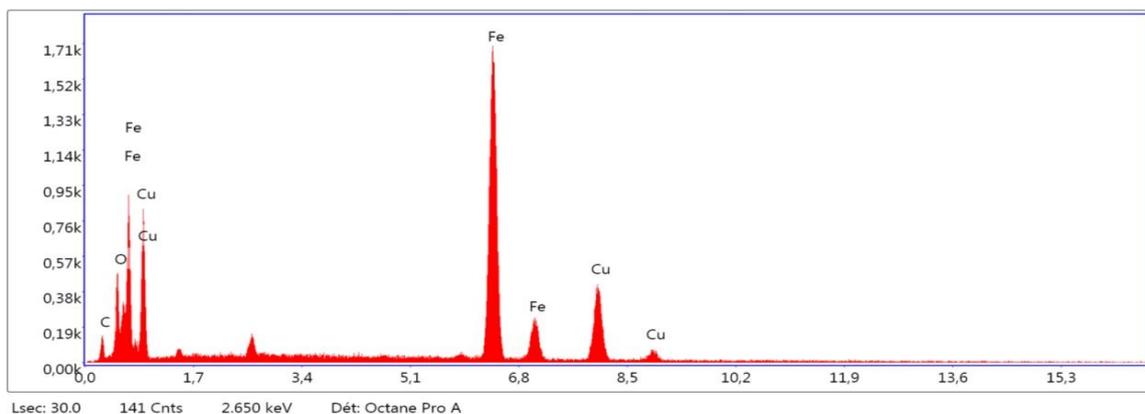
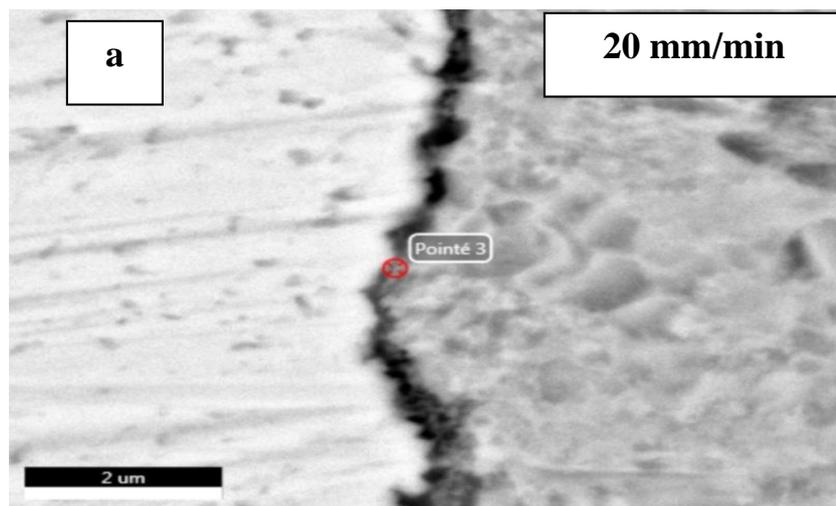


**Figure IV.9.** (a,b,c) : Micrographie au MEB du centre de la zone affectée thermomécaniquement (ZATM) d'un joint de soudure par friction rotative (a)E3, (b) E6, (c) E9

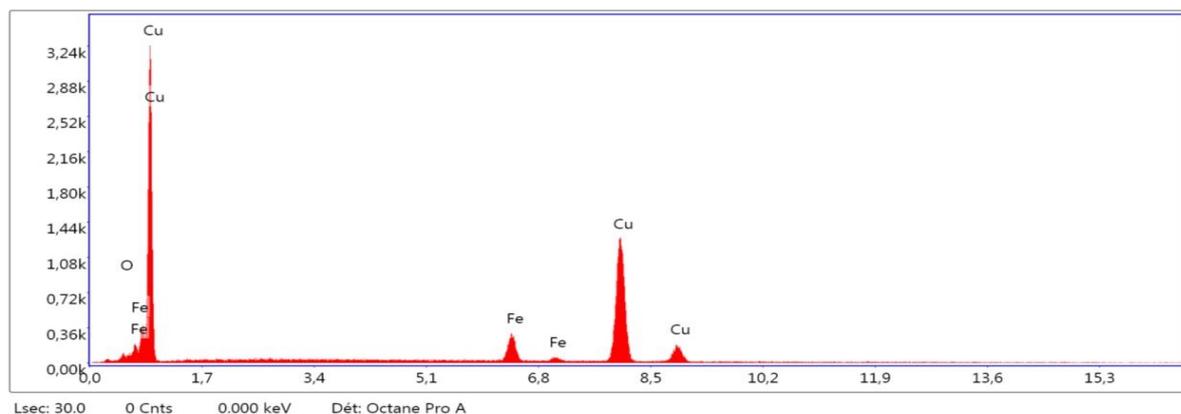
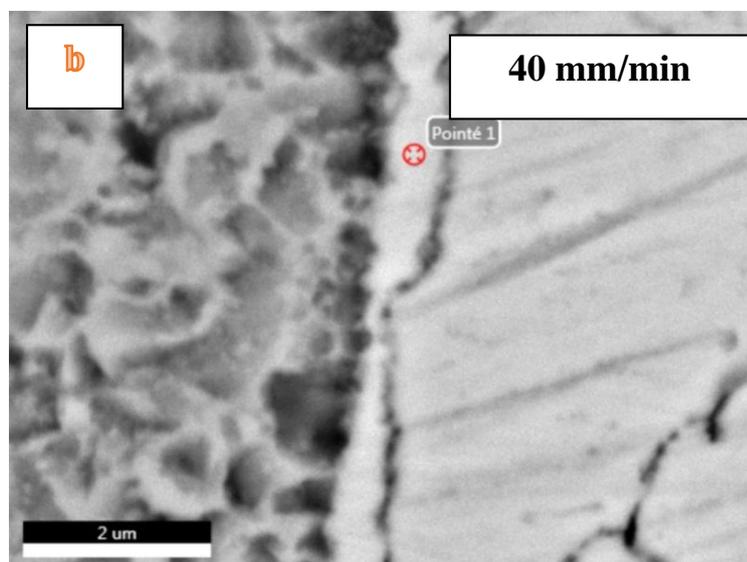
## IV.7. Analyse MEB et EDS

Dans cette partie des travaux réalisés, on présente les analyses chimiques par EDS. La méthode EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) est une microanalyse chimique élémentaire de la surface de l'objet. Une analyse des éléments chimiques en présence a été réalisée à partir d'un détecteur de spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) couplé au MEB. Les résultats obtenus sont présentés à la figure IV.10. (a,b,c) À partir des spectres EDS et du pourcentage en poids des éléments d'alliage présents, on trouve l'analyse EDS a été effectuée sur la zone intermétallique d'échantillon N=1 de Vitesse de rotation  $V = 710 \text{ tr/min}$  et de vitesse d'avance  $v_a = 20 \text{ mm/min}$  car elle est illustrée à la figure IV.10. (a). Les principaux éléments mesurés sont Fe, Cu et O. L'analyse EDS confirme l'existence des principaux éléments, 15,7% de cuivre et 37,34% de fer avec présence d'oxygène. L'oxygène avec la combinaison de cuivre ou de fer peut former de l'oxyde de cuivre ou de l'oxyde de fer.

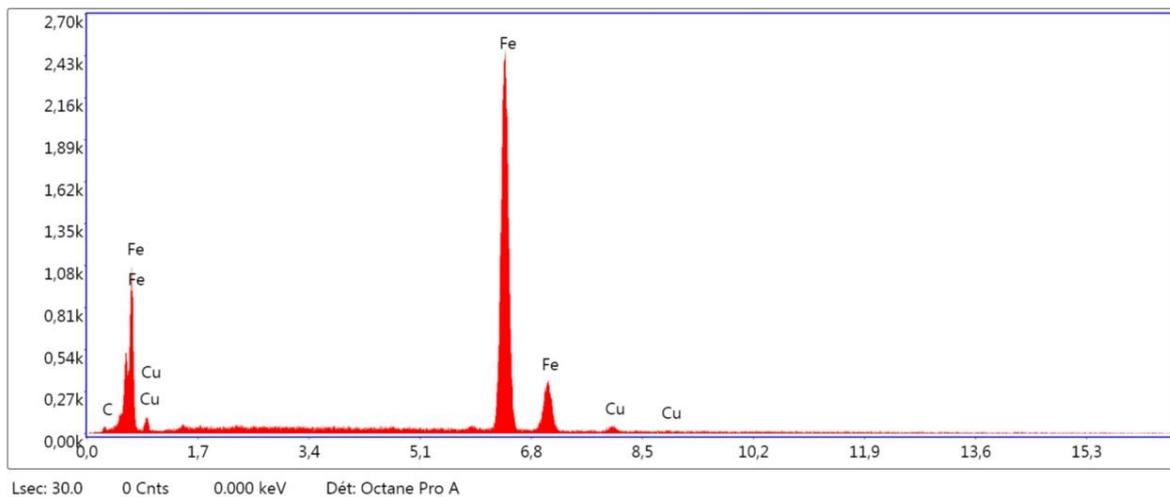
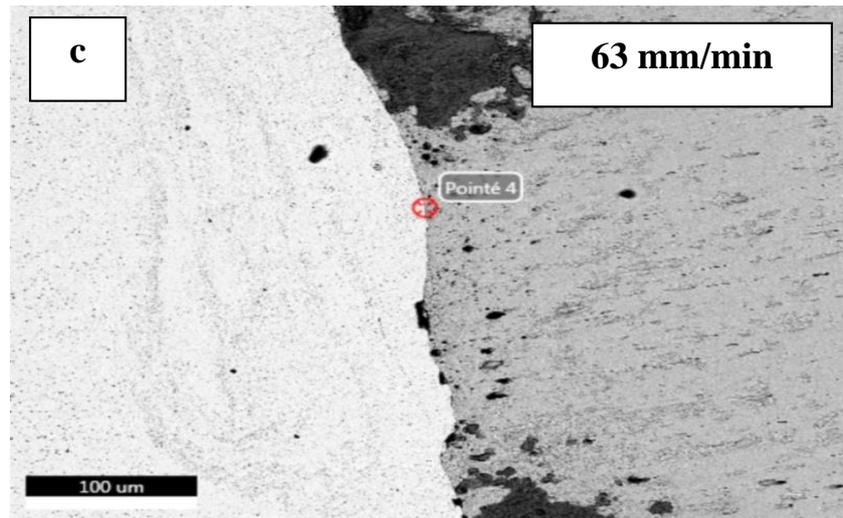
### IV.7.1. Vitesse de rotation 700 tr/min



Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	19.96	38.96	30.55	12.17	0.0639	1.1454	0.2796	1.0000
O K	27.00	39.57	110.31	10.34	0.0691	1.1049	0.2316	1.0000
FeK	37.34	15.68	789.52	2.36	0.3525	0.8757	1.0326	1.0445
CuK	15.70	5.79	203.94	4.29	0.1220	0.8444	0.9070	1.0149



Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	4.99	17.09	17.84	14.63	0.0176	1.2634	0.2787	1.0000
FeK	8.81	8.64	127.95	6.40	0.1187	1.0138	0.9772	1.3592
CuK	86.19	74.27	661.44	2.19	0.8281	0.9806	0.9786	1.0011



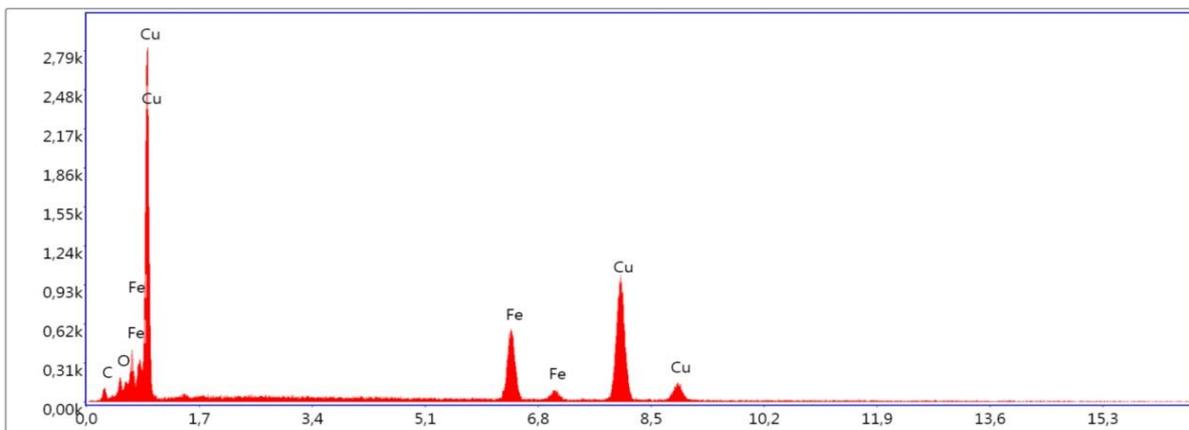
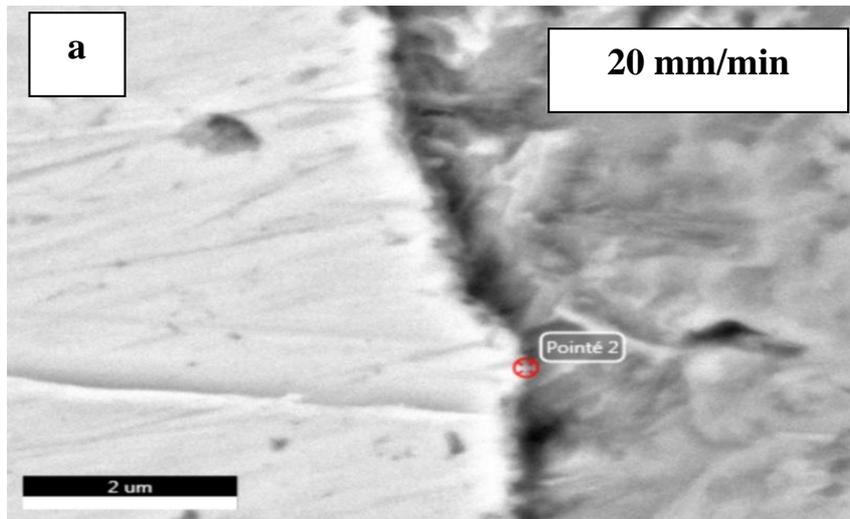
Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Dét: Octane Pro A

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	18.41	51.29	12.44	14.82	0.0570	1.2201	0.2537	1.0000
FeK	79.11	47.40	1137.48	1.89	0.7641	0.9403	1.0230	1.0042
CuK	2.48	1.31	18.10	22.79	0.0161	0.9080	0.7069	1.0109

**Figure IV.10. (a, b, c) :** Microstructural évolution du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 700 tr/min

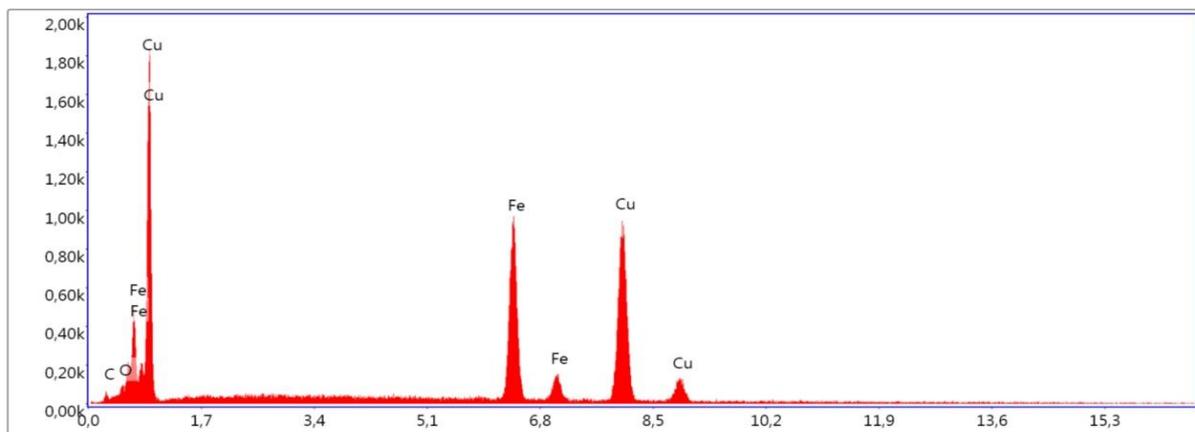
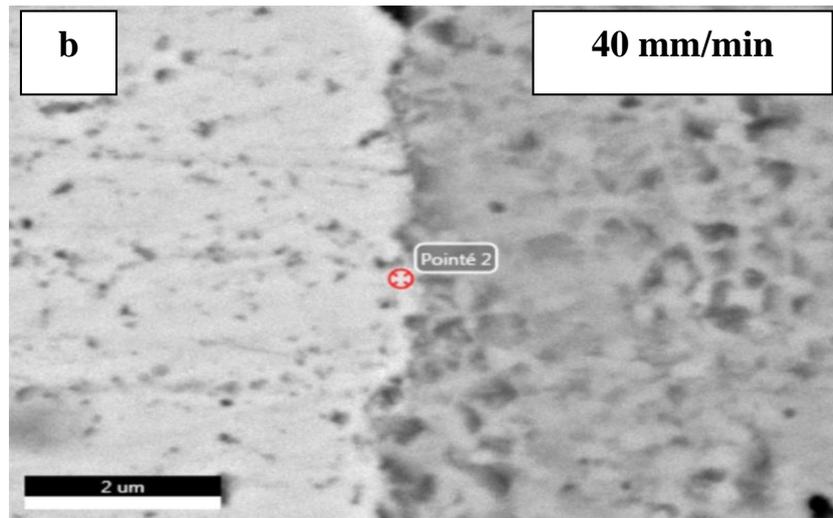
IV.7.2. Vitesse de rotation 1000 tr/min

L'analyse EDS effectuée dans une zone définie par le pointé 2 présenté dans la figure IV.11. (a). du l'interface a montré que l'interface était formée de, 8.21% Fe et 27.56% Cu (tableau 7). Ainsi, la présence de phases intermétalliques à l'interface est évidente.



Lsec: 30.0 50 Cnts 2.650 keV Dét: Octane Pro A

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	28.46	45.73	29.14	11.36	0.1019	1.1036	0.3242	1.0000
O K	35.69	43.04	73.08	11.32	0.0790	1.0633	0.2082	1.0000
FeK	8.21	2.84	252.34	5.14	0.0911	0.8386	1.0875	1.2164
CuK	27.65	8.40	498.38	2.55	0.2335	0.8081	1.0271	1.0174

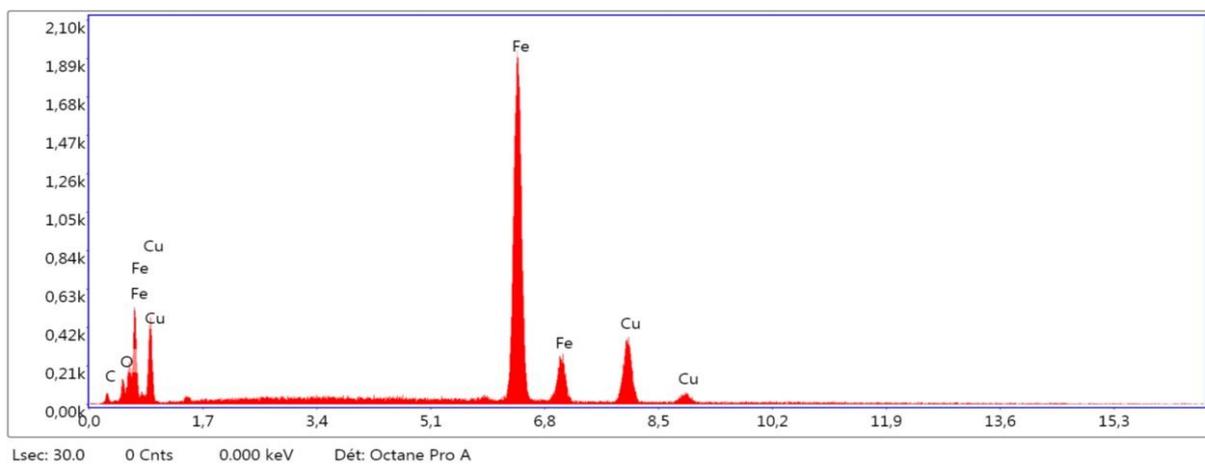
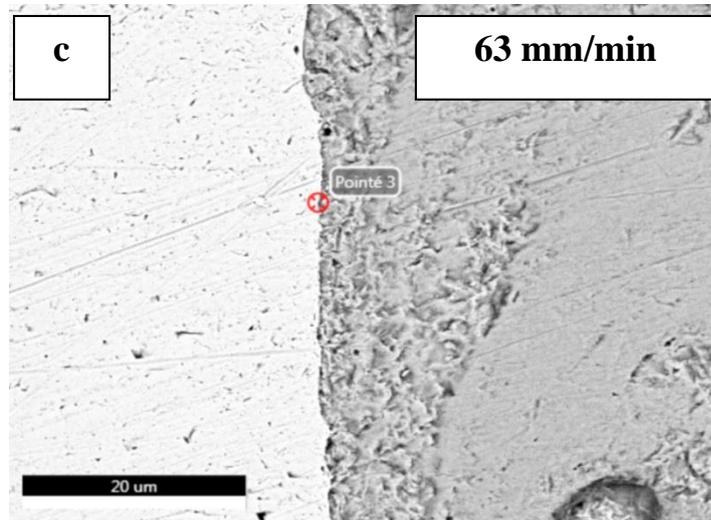


Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Dét: Octane Pro A

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	18.05	43.24	15.31	14.22	0.0516	1.1954	0.2393	1.0000
O K	13.52	24.32	33.09	12.69	0.0334	1.1542	0.2138	1.0000
FeK	23.31	12.01	415.24	3.27	0.2484	0.9199	1.0106	1.1459
CuK	45.12	20.43	471.27	3.03	0.3755	0.8881	0.9310	1.0066

L'analyse EDS a été effectuée dans l'interface car elle est illustrée à la figure IV.11. (a, b ,c) Les principaux éléments mesurés sont Fe, Cu et O tels que présentés dans l'EDS sélectionné spectre présenté sur la figure IV.11. (c). L'analyse EDS réalisée sur un côté cuivre du l'interface confirme l'existence des principaux éléments, 16.85% cuivre et 48.90% fer avec présence d'oxygène15.69%. l'oxygène avec la combinaison de cuivre ou de fer peut forment de l'oxyde de cuivre ou de l'oxyde de fer. Comme mentionné par Sahin [2], la présence de phases

intermétalliques au l'interface est évidente. En plus de cela, la présence de fer dans le côté cuivre confirme la diffusion de cet élément en cuivre.

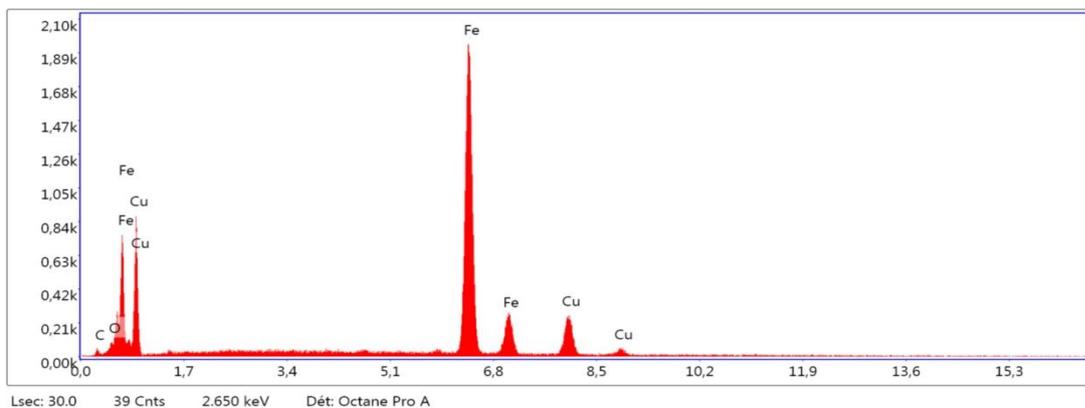
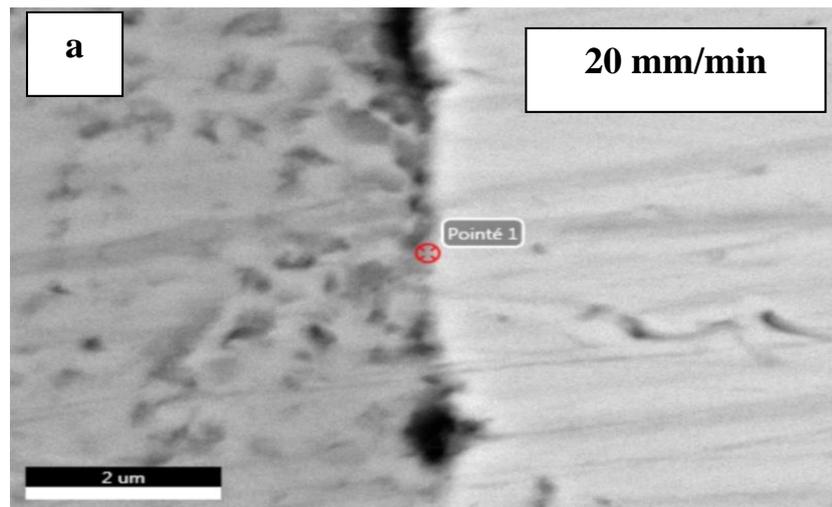


Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	18.56	42.15	14.99	13.70	0.0583	1.1795	0.2665	1.0000
O K	15.69	26.75	35.01	11.96	0.0412	1.1385	0.2307	1.0000
FeK	48.90	23.88	893.89	2.26	0.4740	0.9056	1.0339	1.0354
CuK	16.85	7.23	171.61	5.67	0.1200	0.8738	0.8057	1.0115

Figure IV.11. (a, b, c) : Analyse chimique par EDS du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1000 tr/min

### IV.7.3. Vitesse de rotation 1400 tr/min

L'analyse EDS a été effectuée dans l'interface car elle est illustrée à la figure IV.12.(a, b, c). Les principaux éléments mesurés sont Fe, Cu et O tels que présentés dans l'EDS sélectionné spectre présenté sur la figure IV.12. (a). L'analyse EDS réalisée sur un côté fer de l'interface confirme l'existence des principaux éléments, 15.57% cuivre et 61.67% fer avec une faible présence d'oxygène 9.5%.

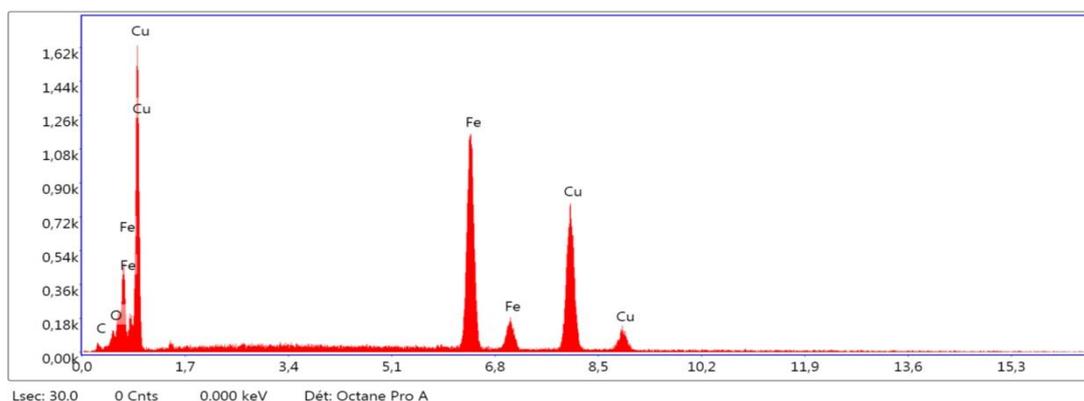
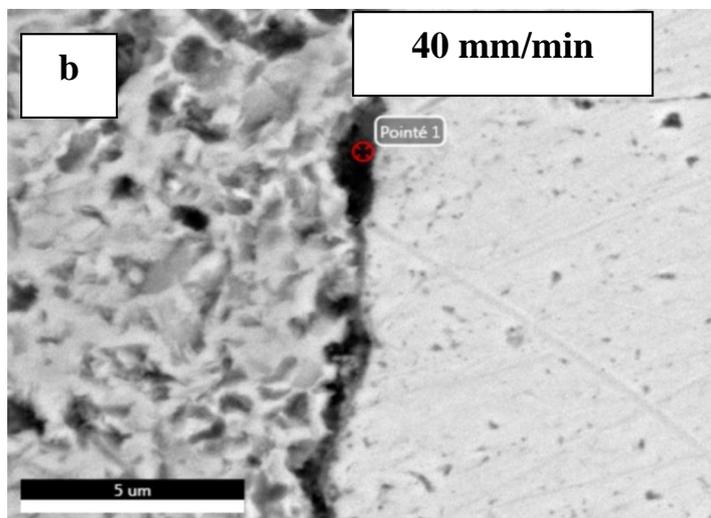


Lsec: 30.0 39 Cnts 2.650 keV Dét: Octane Pro A

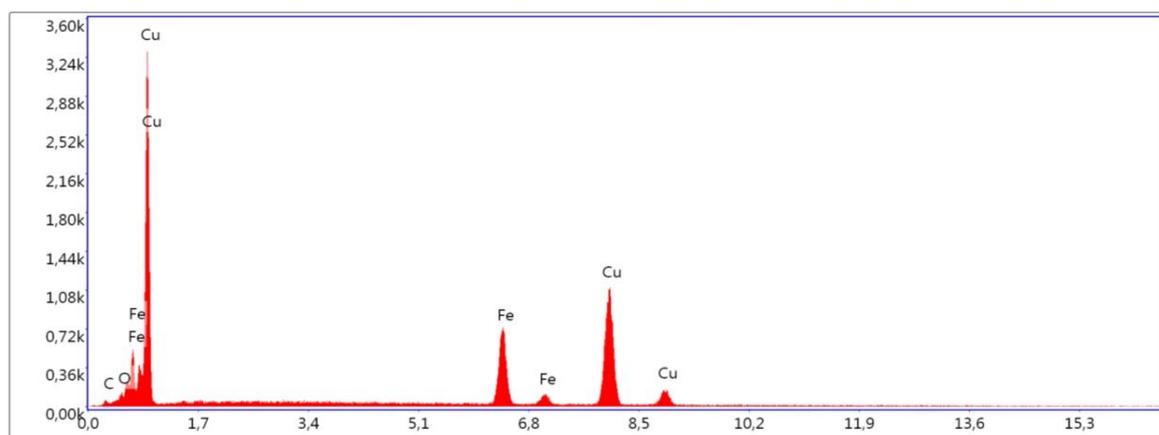
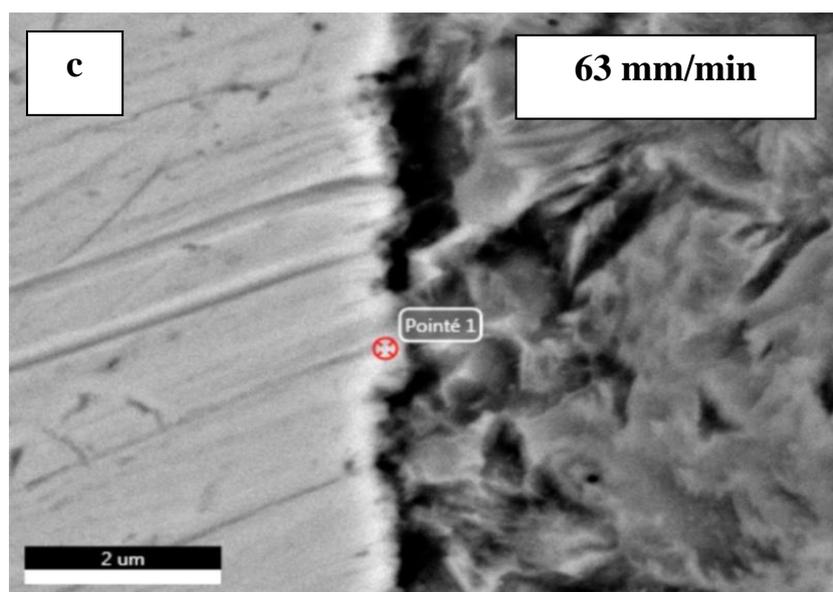
Élément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	13.25	36.21	11.34	15.13	0.0389	1.2152	0.2418	1.0000
O K	9.51	19.51	26.94	12.68	0.0276	1.1735	0.2476	1.0000
FeK	61.67	36.24	896.48	1.99	0.6006	0.9360	1.0143	1.0256
CuK	15.57	8.04	128.71	5.99	0.1152	0.9038	0.8111	1.0098

L'analyse EDS a été effectuée dans l'interface car elle est illustrée à la figure IV.12.(a,b,c). Les principaux éléments mesurés sont Fe, Cu et O tels que présentés dans l'EDS sélectionné spectre présenté sur la figure IV.12. (b). L'analyse EDS réalisée sur un côté fer de l'interface confirme

l'existence des principaux éléments, 40.66% cuivre et 34.27% fer avec une présence d'oxygène 11.44%. La présence de cuivre côté fer confirme la diffusion de cet élément en fer. On a pu constater la bonne soudabilité des deux matériaux cuivre et fer.



Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	13.64	36.58	12.37	14.98	0.0379	1.2159	0.2284	1.0000
O K	11.44	23.03	34.22	12.33	0.0314	1.1743	0.2335	1.0000
FeK	34.27	19.77	547.91	2.60	0.3549	0.9372	1.0051	1.0992
CuK	40.66	20.62	385.18	3.45	0.3342	0.9050	0.9021	1.0066



Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Dét: Octane Pro A

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	19.97	42.98	17.43	13.48	0.0593	1.1725	0.2532	1.0000
O K	19.51	31.52	45.94	11.81	0.0469	1.1317	0.2127	1.0000
FeK	15.40	7.13	329.25	3.75	0.1691	0.9002	1.0209	1.1951
CuK	45.13	18.37	558.73	2.56	0.3800	0.8686	0.9622	1.0076

Figure IV.12. (a, b, c) : MEB et analyse par EDS du joint Cuivre/Acier soudé par friction rotation sous les conditions suivantes : Vitesse de rotation 1400 tr/min.

## IV.8. Mesures de dureté des joints soudés

Afin d'évaluer la variation locale de la résistance mécanique des joints, de nombreuses mesures de dureté ont été réalisées à différents endroits de la section du joint de soudure.

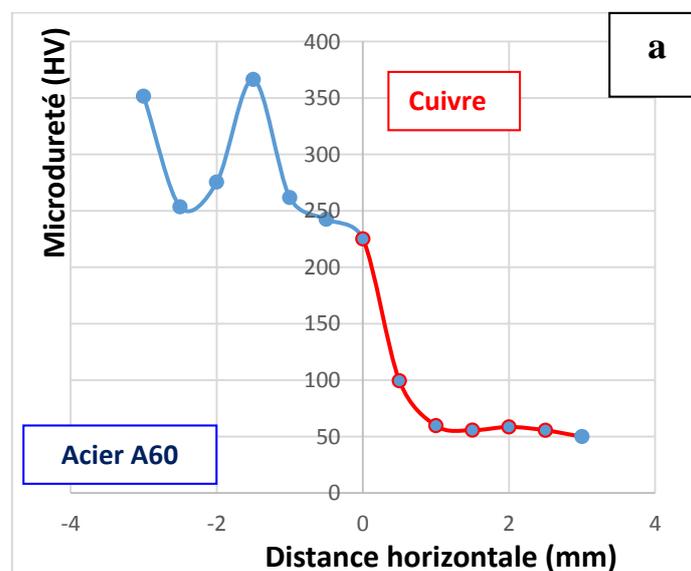
Dans cette partie d'étude, les résultats des mesures de dureté Vickers ont été sous forme de courbes qui montrent les profils de dureté à travers du joint soudé comme il est montré dans toutes les figures (FigIV.13,14,15). Ils montrent l'évolution de la dureté d'une zone à l'autre pour différents échantillons soudés sous différentes conditions opératoires.

La variation de la dureté à travers le joint de soudure suivant la direction longitudinale dépend de l'emplacement des mesures, il peut être divisé en trois zones. La zone à dureté élevée qui correspond à la zone déformée plastiquement (ZATM), la zone non affectée, dont la dureté est presque égale à la dureté du métal de base, la zone affectée par la chaleur (ZAT), dont les valeurs de la dureté varient en fonction de la variation de la vitesse de rotation.

Globalement la dureté de la partie acier est plus élevée par rapport à celle du cuivre. Seulement des valeurs variables dans la zone centrale du joint soudé.

### IV.8.1. Vitesse de rotation 710 tr/min

Des mesures de microdureté Vickers ont été effectuées sur les échantillons E1, E2, E3 de vitesse d'avance 20 mm/min, 40 mm/min, 63 mm/min de la soudure afin de déterminer la résistance de la trois zones microstructurales dans l'acier (A60) et le cuivre respectivement, comme le montre la figure IV.13.(a). On a pu constater une dureté maximale de l'échantillon E1 de 242.4 HV a été obtenu près de l'interface de soudure dans de l'acier (A60) et 99.4 HV dans du cuivre. Ont été enregistrée dans la zone du joint soudé.



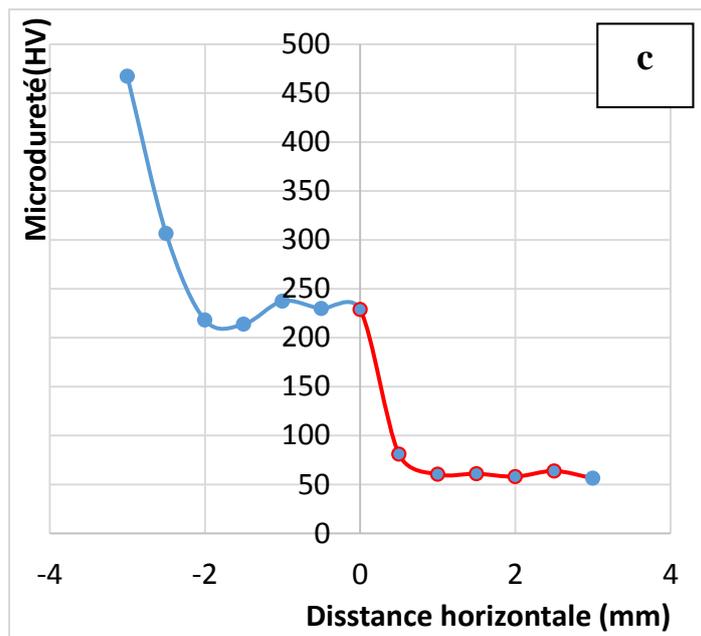
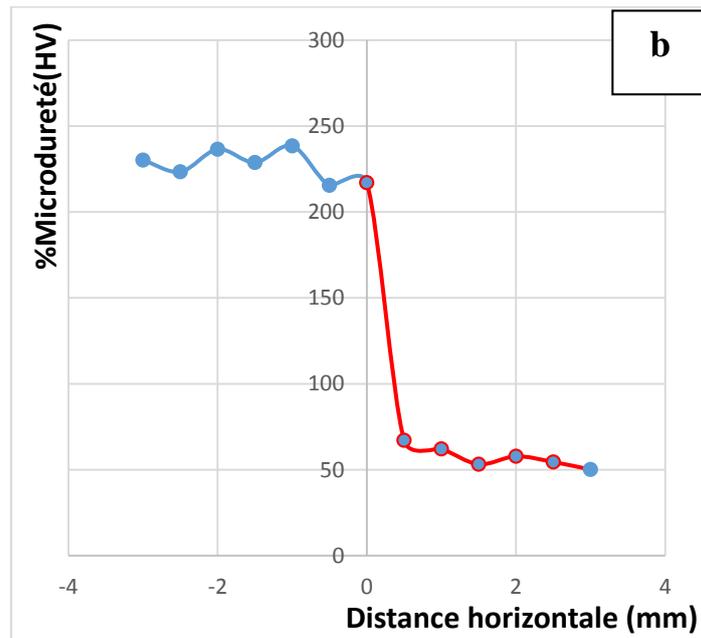
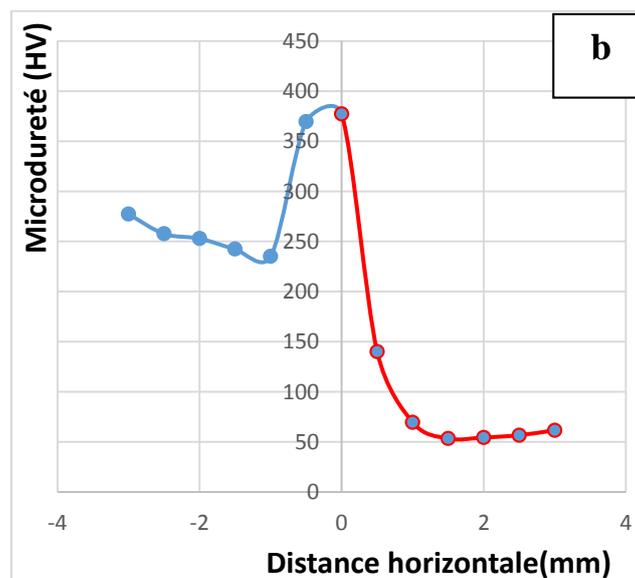
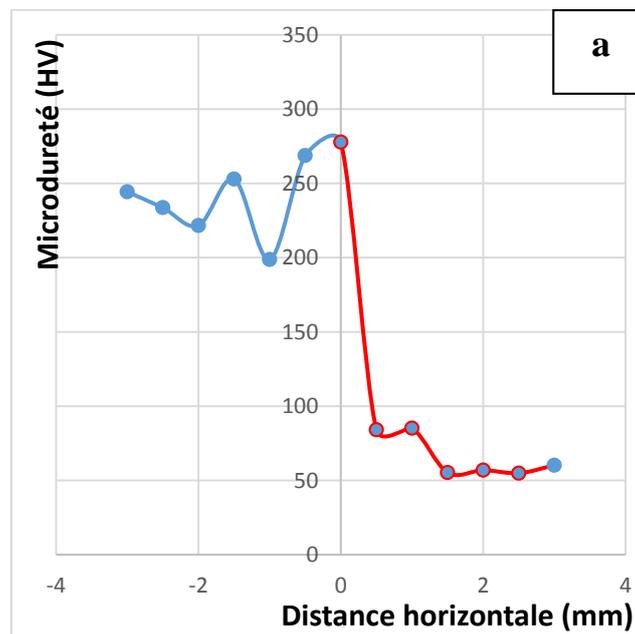
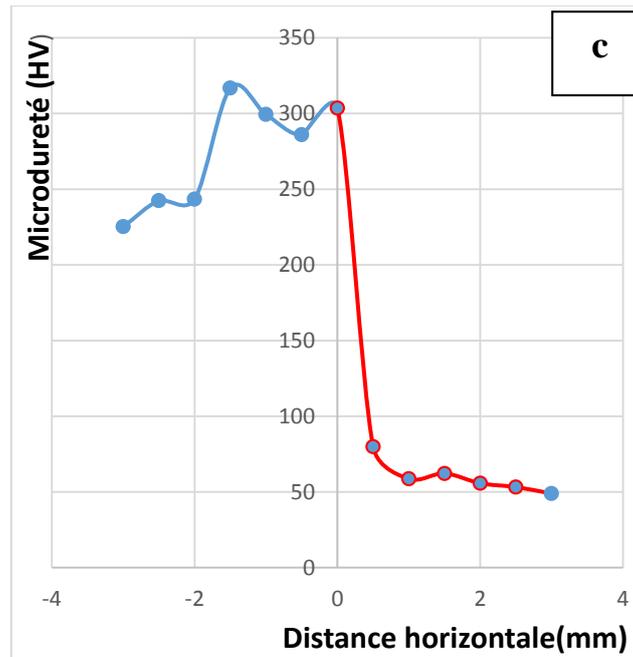


Figure IV.13 : Profils de microdureté Vickers le long du joint Cuivre/Acier soudé sous une vitesse de rotation 710 tr/min.

### IV.8.2. Vitesse de rotation 1000 tr/min

Des mesures de microdureté Vickers ont été effectuées sur les échantillons E4, E5, E6 de vitesse d'avance 20 mm/min, 40 mm/min, 63 mm/min de la soudure afin de déterminer la résistance de la trois zones microstructurales dans l'acier (A60) et le cuivre respectivement, comme le montre la figure IV.14.(b). On a pu constater une dureté maximale de l'échantillon E5 de 377.2 HV a été obtenu près de l'interface de soudure dans de l'acier (A60) et 140.1 HV dans du cuivre. Dans la zone de soudure.

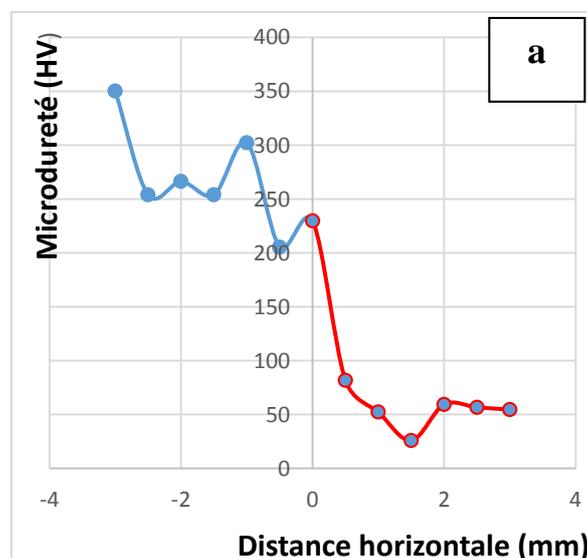


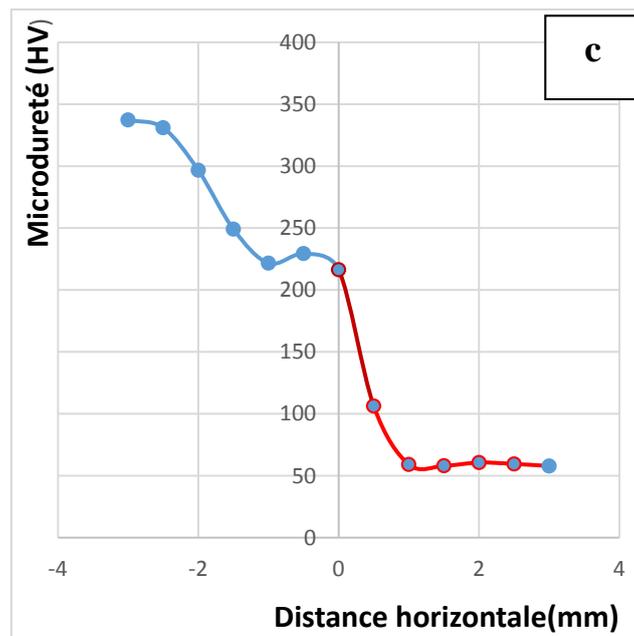
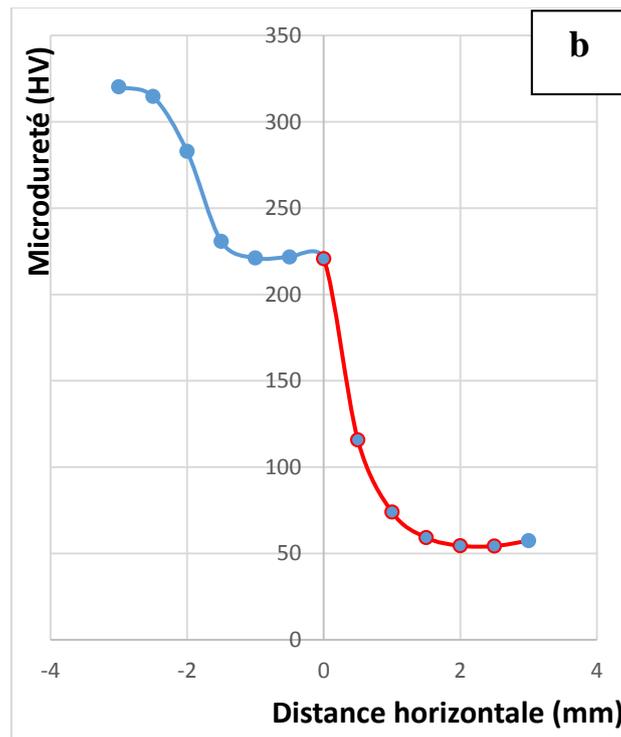


**Figure IV.14** : Profils de microdureté Vickers le long du joint Cuivre/Acier soudé sous une vitesse de rotation 1000 tr/min.

### IV.8.3. Vitesse de rotation 1400 tr/min

Des mesures de microdureté Vickers ont été effectuées sur les échantillons E7, E8, E9 de vitesse d'avance 20 mm/min, 40 mm/min, 63 mm/min de la soudure afin de déterminer la résistance de la trois zones microstructurales dans l'acier (A60) et le cuivre respectivement, comme le montre la figure IV.15.(b). On a pu constater une dureté maximale de l'échantillon E8 de 220.7 HV a été obtenu près de l'interface de soudure dans de l'acier (A60) et 115.8 HV dans du cuivre. Dans la zone de soudure.





**Figure IV.15 :** Profils de microdureté Vickers le long du joint Cuivre/Acier soudé sous une vitesse de rotation 1400 tr/min.

### IV.9. Essais de traction des joints soudés

Des essais de traction ont été réalisés sur les barres soudées pour voir leurs résistances mécaniques.

### IV.9.1. Observation macroscopiques après rupture des éprouvettes

La figure IV.16 présente l'état des éprouvettes après rupture sous l'effet des essais de tractions. On constate que la rupture a eu lieu au niveau du joint soudé malgré le changement des conditions de soudage (Fig IV.16.a). Mais en observant les faciès de rupture (Fig IV.16.b), on constate qu'il y'avait un arrachement de cuivre mais des résidus de cuivre reste encore attachés sur l'acier. Ce comportement est dû à la grande ductilité du cuivre par rapport à l'acier qui est plus rigide.

La rupture au niveau de cuivre a été observée aussi par Anathapad et al [1]. Ce type fracture est fragile car il est effectué par un arrachement de matière.

Certaines travaux considèrent ce type de rupture est fragile [3]



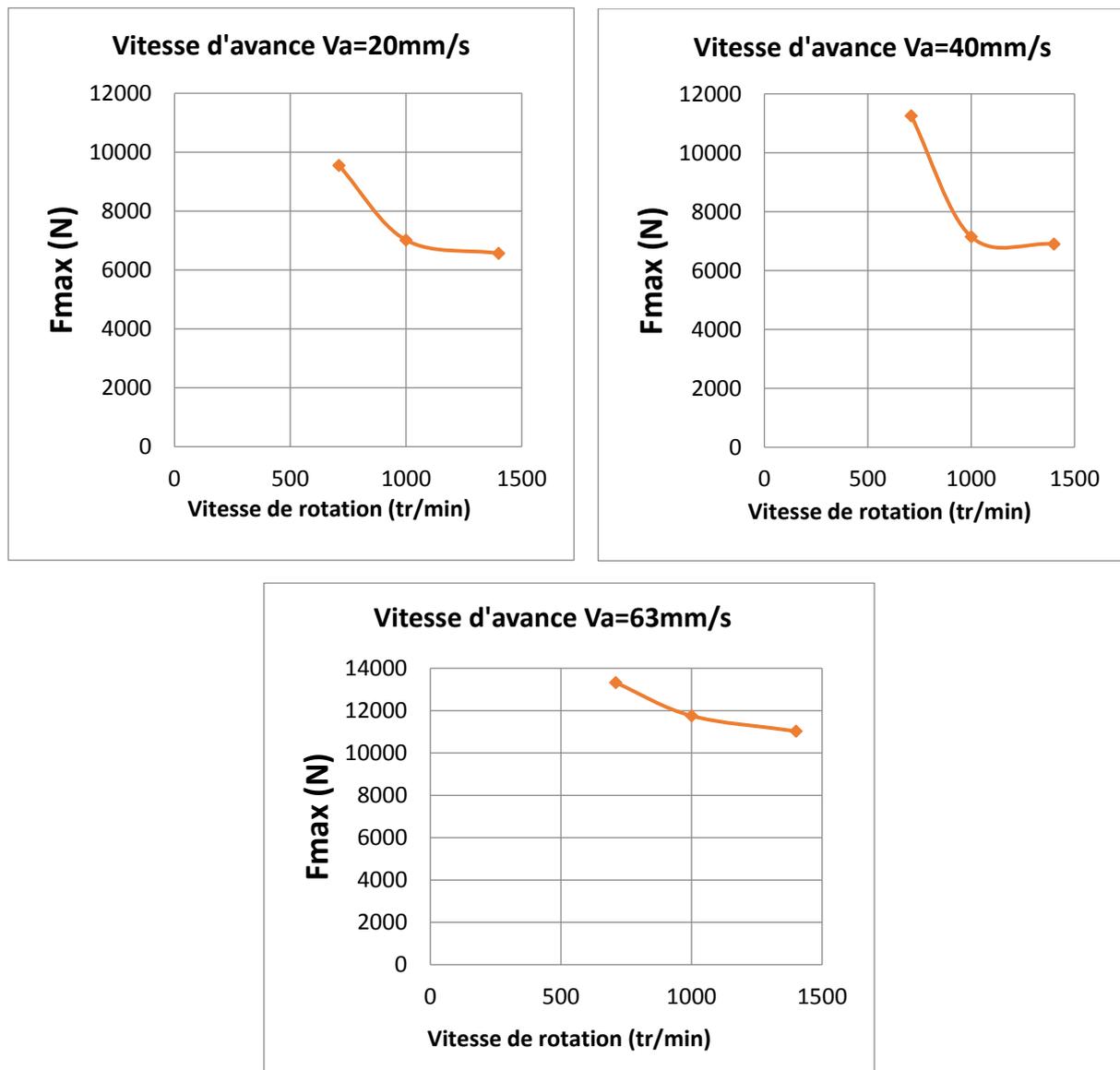
**Figure III.16 :** Observation macroscopiques après rupture des éprouvettes.

## IV.9.2. Grandeurs mécaniques déduites des essais de traction :

Les principales grandeurs mécaniques ont été déduites des courbes de l'essai de tractions obtenues à partir des différentes barres soudées.

### IV.9.2.1. Effort maximal $F$ (N)

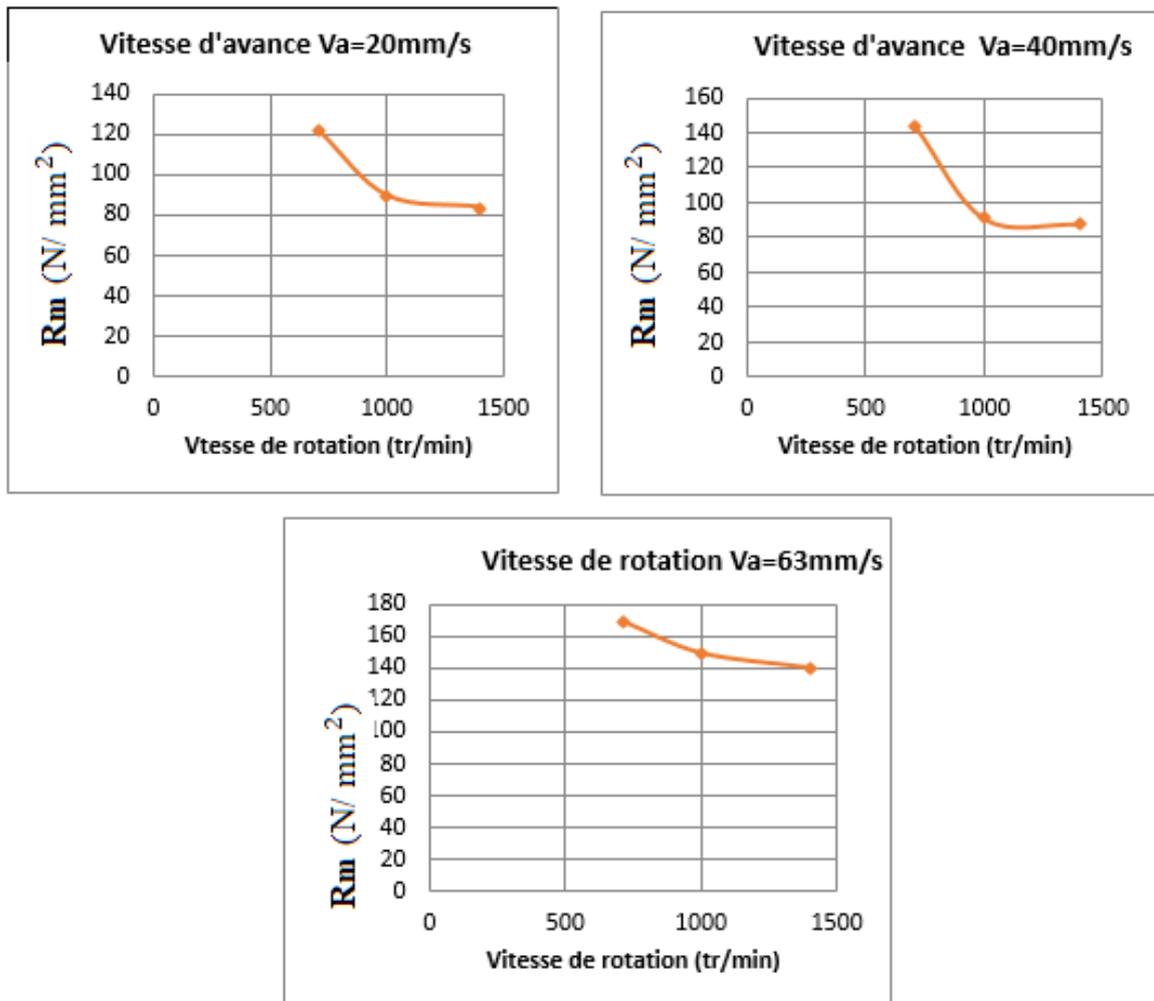
La figure IV.17 présente les courbes de variation de l'effort maximal  $F$  en fonction de la vitesse de rotation lors du soudage du joint Cuivre/Acier. On constate que plus la vitesse de rotation augmente, plus la force maximale diminue.



**Figure IV.17 :** Variation de l'effort maximal  $F$  du joint Cuivre/Acier soudé en fonction de la vitesse de rotation.

**IV.9.2.2. Résistance maximale  $R_m$  ( $N/mm^2$ )**

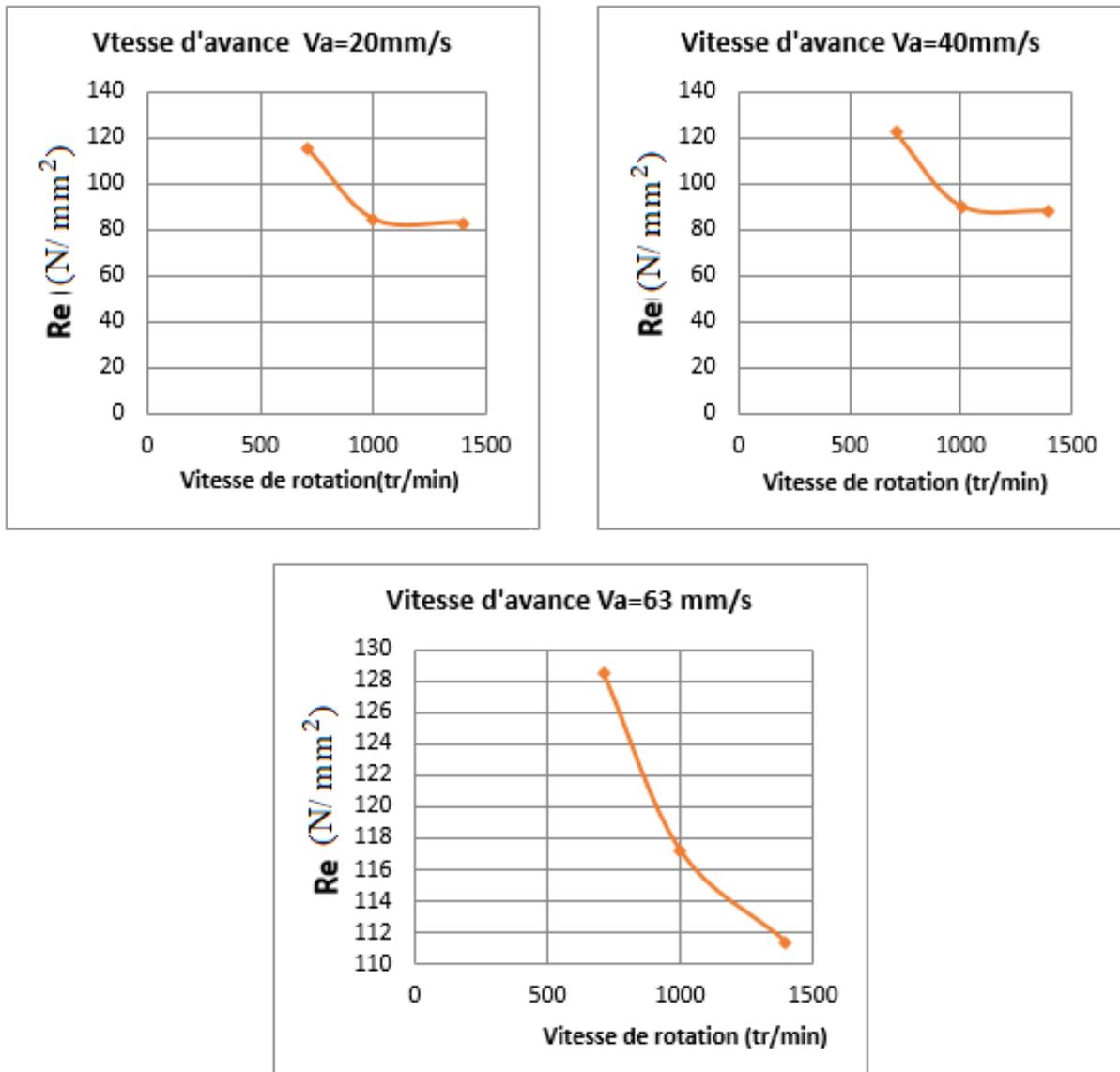
La figure IV.18. Présente les courbes de variation de la résistance maximale  $F$  en fonction de la vitesse de rotation lors du soudage du joint Cuivre/Acier. On constate que plus la vitesse de rotation augmente, plus la force maximale diminue.



**Figure IV.18 :** Variation de la résistance maximale  $R_m$  du joint Cuivre/Acier soudé en fonction de la vitesse de rotation

### IV.9.2.3. La limite élastique $Re$ ( $N/mm^2$ )

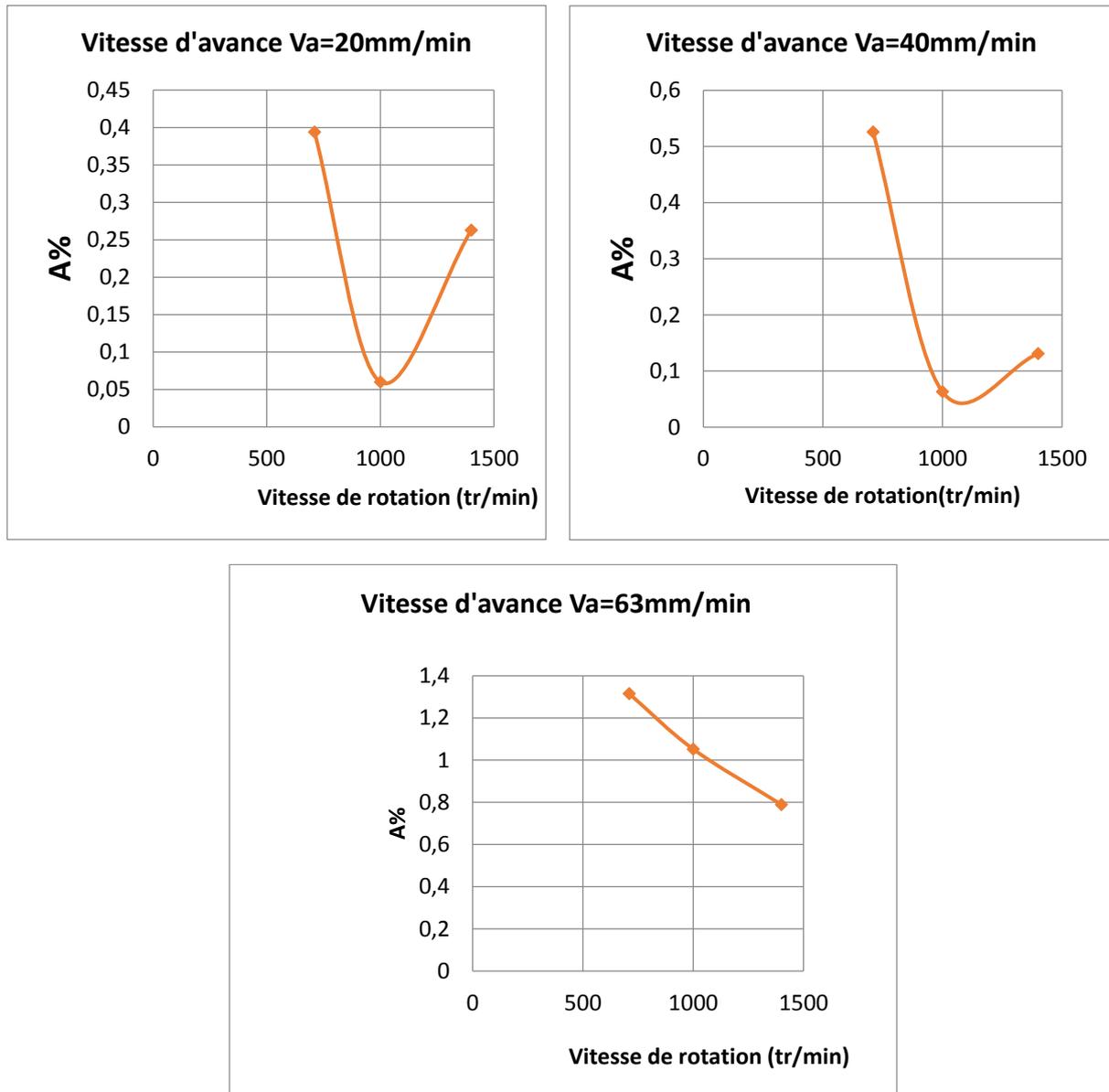
La figure IV.19. Présente les courbes de variation de la limite élastique  $Re$  en fonction de la vitesse de rotation lors du soudage du joint Cuivre/Acier. On constate que la limite élastique diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation.



**Figure IV.19 :** Variation de la limite élastique  $Re$  en fonction de la vitesse de rotation lors du soudage du joint Cuivre/Acier

#### IV.9.2.4. Allongement A%

La figure IV.20. Présente les courbes de variation de l'allongement A % du joint Cuivre/Acier soudé en fonction de la vitesse de rotation. Pour les deux premières vitesses d'avance ; on constate que l'allongement diminue et puis augmente. Mais pour la vitesse d'avance de 63 mm/min, elle diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation.



**Figure IV.20 :** Variation de l'allongement A % en fonction de la vitesse de rotation lors du soudage du joint Cuivre/Acier

## **Bibliographie**

- [1] D.Ananthapadmanaban, R.V.Seshagiri , A.Nikhil , R.V.Prasad , “A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints”, *Materials and Design* 30 (2009) 2642-2646.
- [2] M.Sahin, (2016). Optimizing the Parameters for Friction Welding Stainless Steel to Copper Parts. *Materials. And. Technology.*, 50(1), pp. 109–115.
- [3] W.Lee, SB. Jung, (2003). Effect of micro structuralvariation on the Cu/CK45carbon steel friction weld joints, *Z. Metallkd.* 94. pp.1300–1306.*Materials. And. Technology* 50, 1, pp.109–115.

# Conclusion générale

Dans ce travail de thèse, des joints soudés par friction rotative ont été effectués sur des barres de cuivre industriel avec un acier A60. La vitesse de rotation et la vitesse de déplacement ont été modifiées pour réaliser le meilleur joint soudé. Les techniques de caractérisation utilisées sont l'essai de traction, les mesures de dureté et les observations microscopes ont été effectués en utilisant le microscope optique et le microscope électronique à balayage.

Nos principaux résultats sont les suivants :

- Les observations au microscope optique ont révélé différentes zones dans le joint soudé et surtout la zone affectée thermo mécaniquement (ZATM) qui varie selon les paramètres de soudage par friction rotative.
- A travers les observations MEB, on a pu constater la bonne soudabilité des deux matériaux.
- Les profils de microdureté ont montré que la dureté de la partie acier est la plus élevée par rapport à celle du cuivre. Seulement des valeurs variables ont été enregistrées dans la zone centrale du joint soudé.
- On a constaté que la rupture après les différents essais de traction a eu lieu au niveau du joint soudé mais dans la partie cuivre et qui est en accord avec les travaux antérieurs.
- la limite élastique diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation.
- plus la vitesse de rotation augmente, plus la force maximale diminue.

## **Perspectives**

Il sera intéressant de caractériser le joint soudé par d'autres techniques de caractérisation telle que la nano indentation pour mieux connaître les propriétés mécaniques de chaque zone.

## Résumé

Dans ce travail de thèse, des soudures par friction rotation ont été effectuées sur des barres d'acier en cuivre industriel avec un acier A60. La vitesse de rotation et la vitesse de déplacement ont été modifiées pour avoir le meilleur joint soudé. Les techniques de caractérisation utilisées sont l'essai de traction, des mesures de dureté et des observations microscopes ont été effectués en utilisant le microscope optique et le microscope électronique à balayage. La variation des conditions de soudage nous ont permis de déterminer les conditions optimales pour réaliser un joint de soudure de qualité.

**Mot clés :** Soudage-métaux-dissimilaires-microstructure-propriétés-mécaniques

## Abstract

In this thesis work, friction rotation welding was performed on industrial copper steel bars with an A60 steel. The rotation speed and the displacement speed were modified to have the best-welded joint. The characterization techniques used are tensile test, hardness measurements and microscopic observations were performed using optical and scanning electron microscope. The variation in welding conditions allowed us to determine the optimal conditions to achieve a quality weld joint.

**Key words:** Welding-dissimilar-metals-microstructure-mechanical-properties

## ملخص

في هذا البحث، تم إجراء لحام احتكاك دوراني على قضبان من النحاس مع الفولاذ A60. تم تغيير سرعة الدوران وسرعة السير للحصول على أفضل وصلة ملحومة. تقنيات التوصيف المستخدمة هي اختبار الشد وقياسات الصلادة والملاحظات المجهرية التي تم إجراؤها باستخدام المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني الماسح. سمح لنا التباين في ظروف اللحام بتحديد الظروف المثلى لتحقيق وصلة لحام عالية الجودة.

**الكلمات المفتاحية:** اللحام-المعادن المتباينة-البنية الدقيقة-الخواص الميكانيكية