



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE
Spécialité : Ingénierie des matériaux et des
surfaces



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en Ingénierie des matériaux et
des surfaces.

Etude du BRASAGE

Proposé et encadré par :

- **P. BACHA Nacer-Eddine**

Réalisé par :

- **BETROUNI Ahmed**
- **KOUINI Mohamed**

Année universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, nous rendons grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents ainsi qu'à l'ensemble de nos familles, dont le soutien moral, matériel et affectif a été essentiel à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadrant, Monsieur Bacha Nacer-Eddine, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, son encadrement attentif et sa confiance tout au long de ce projet.

Nous remercions également les membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail, ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont apporté leur aide, leur soutien ou leurs encouragements.

Sommaire

Table des matières

1	Chapitre 1	2
2	Généralité sur le brasage	2
	1.1 Le brasage	3
	1.2 Les types de brasage	3
	1.2.1 Le brasage fort.....	3
	1.2.2 Le brasage tendre	4
	1.3 Les techniques de brasage.....	5
	1.3.1 Brasage au four	5
	1.3.2 Brasage par induction	7
	1.3.3 Le brasage a la flamme (au chalumeau)	14
	1.3.4 Brasage par immersion	15
	1.3.5 Brasage à la vague	19
	1.3.6 Brasage par résistance	22
	1.4 Les métaux d'apport	24
	1.4.1 Les classifications standard des métaux d'apport et les applications pour chacun	25
	1.4.2 Familles de métaux d'apport	26
	1. Métaux d'apport pour brasage à basse température (classe Al)	26
	2. Alliages à base d'argent	26
	3. Alliages cuivre-phosphore et alliages à base de cuivre (Class CuP et Class Cu)	27
	4. Métaux d'apport pour brasage à haute température (classe Ni, classe Pd et classe Au)	27
	1.4.3 L'état de la surface.....	28
3	Chapitre 2	30
4	Méthodologies expérimentales	30
	2.1 INTRODUCTION.....	30
	2.2 Matériaux.....	30
	2.2.1 Les matériaux d'études	30
	2.2.2 Matériaux d'apport.....	31
	2.3 Chalumeau Express	32
	2.3.1 Spécifications techniques.....	33
	2.4 Chauffage par induction.....	33

2.4.1	Caractéristiques principales	34
2.4.2	Caractéristiques de sécurité.....	34
2.4.3	Caractéristiques Générales	35
2.5	Four à moufle	36
2.5.1	Données du produit.....	36
2.5.2	Informations techniques.....	37
2.6	Microscopie optique	37
2.7	Chalumeau oxy-acétylène.....	38
2.7.1	le fonctionnement du chalumeau oxyacétylénique.....	38
2.8	Préparation des échantillons.....	39
3	30
5	28
6	Chapitre 3	28
7	RESULTATS & DISCUSSIONS	28
3.1	Introduction.....	40
3.2	Préparation des échantillons.....	40
3.3	Brasure avec des métaux d'apport commerciaux	41
3.3.1	Brasage à l'étain commercial	41
3.3.2	Brasage à la baguette d'argent	53
3.3.3	Baguette 'fausse brasure'	56
3.4	Brasure avec des métaux d'apport fabriqués au LTSM	58
3.4.1	Broyage mécanique	58
3.5	Fabrication de métaux d'apport au four de fusion.....	65
	CONCLUSION GENERALE	41

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : PRINCIPE DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION.....	9
-------------------------------------------------------	---

FIGURE 1.2 : PRINCIPE DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION.....	9
FIGURE 1.3 : CONCEPTIONS DE BOBINES POPULAIRES POUR LE CHAUFFAGE EXTERNE.	12
FIGURE 1.4 : INDUCTEURS POUR LE CHAUFFAGE INTERNE ET LES SURFACES PLANES.	12
FIGURE 1.5:EFFICACITE DU CHAUFFAGE A PROXIMITE D'UN INDUCTEUR.	13
FIGURE 1.6: FORMES FABRIQUEES ET USEES D'UN INDUCTEUR SOLIDE A TOUR UNIQUE ET LES MOYENS DE FOURNIR LE REFROIDISSEMENT PAR EAU NECESSAIRE. (A) BOBINE A TOUR UNIQUE ET (B) ET (C) CONSTRUCTION ET REFROIDISSEMENT ALTERNATIFS.	13
FIGURE 1.7: APPAREIL NECESSAIRE POUR BRASAGE PAR RESISTANCE.	22
FIGURE 2.1: DIFFÉRENTS MATÉRIAUX D'ÉTUDES.	30
FIGURE 2.2:ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE D'UN TUBE DE PLOMBERIE.	31
FIGURE 2.3: COMPOSITION CHIMIQUE D'UNE BAGUETTE D'ARGENT POUR BRASURE.	31
FIGURE 2.4: COMPOSITION CHIMIQUE D'UNE BAGUETTE EN LAITON POUR BRASURE.	32
FIGURE 2.5: COMPOSITION CHIMIQUE DU FIL D'ALUMINIUM POUR LA PREPARATION DE NOUVEAUX METAUX D'APPORT.	32
FIGURE 2.6: CHALUMEAU EXPRESS.....	33
FIGURE 2.7: APPAREILS DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION.....	34
FIGURE 2.8:FOUR A MOUFLE CARBOLITE, MODELE AAF 11/7.....	36
FIGURE 2.9: MICROSCOPE OPTIQUE.	38
FIGURE 2.10: POLISSEUSE.	39
FIGURE 3.1: LE PRECHAUFFAGE DES PLAQUES AU CHALUMEAU EXPRESS ET BRASAGE.....	42
FIGURE 3.2: BRASAGE DE PLAQUES CU-ACIER ET ACIER-ACIER A L'ETAIN.	43
FIGURE 3.3: COUPE METALLOGRAPHIQUE DES BRASURES.	44
FIGURE 3.4: PREPARATION DES ECHANTILLONS A BRASER DANS LE FOUR.	45
FIGURE 3.5: FAÇONNAGE DE L'INDUCTEUR DE CUIVRE POUR L'OPERATION D'INDUCTION.	47
FIGURE 3.6: PREPARATION DES ECHANTILLONS A BRASER PAR CHAUFFAGE A INDUCTION.	48
FIGURE 3.8: BRASAGE DES PLAQUES D'ACIER PAR INDUCTION A 15 T ET P= 3.1 KW.....	51
FIGURE 3.7: BRASAGE DES PLAQUES D'ACIER PAR INDUCTION A 17 T ET P= 3.1 KW.....	50
FIGURE 3.9: BRASAGE DES PLAQUES D'ACIER PAR INDUCTION A 12 T ET P= 3.1 KW.....	51
FIGURE 3.10: COUPE TRANSVERSALE DES PLAQUES D'ACIER BRASEES A 12 TESLA ET P = 3.1 KW.	52
FIGURE 3.11: COUPE TRANSVERSALE DES PLAQUES BRASEES ACIER-ACIER A 17 TESLA ET P= 3.1 KW.	53
FIGURE 3.12: MONTAGE DESTINE AU BRASAGE DE TUYAUX D'ACIER-CUIVRE AVEC LA BAGUETTE D'AG.....	54
FIGURE 3.13: BRASAGE DES TUBES ACIER-CUIVRE PAR CHAUFFAGE PAR INDUCTION.	55
FIGURE 3.14: COUPE TRANSVERSALE DES TUBES ACIER-CUIVRE APRES BRASAGE PAR INDUCTION.	56
FIGURE 3.15: BRASURE DES PLAQUES D'ACIER A LA FLAMME OXYACETYLENIQUE.	57
FIGURE 3.16: BRASAGE OXYACETYLENIQUE AVEC UNE BAGUETTE 'FAUSSE BRASURE'.....	57
FIGURE 3.17: COUPE TRANSVERSALE D'UNE BRASURE AVEC LA BAGUETTE 'FAUSSE BRASURE'.	57
FIGURE 3.18:DIAGRAMME DE PHASE ALCu.	59
FIGURE 3.19: PARTICULES DE LA POUDRE ALLIEE CuAl.....	59
FIGURE 3.20: EDS DE LA POUDRE D'ALUMINIUM PUR.....	60

FIGURE 3.21: ASPECT MACROSCOPIQUE DES POUDRES ALCu APRES BROYAGE DE 1H ET 1H30MIN.	61
FIGURE 3.22: PARTICULE ALCu OBTENUES PAR BROYAGE MECANIQUE DURANT 30 MINUTES....	61
FIGURE 3.23: ANALYSE CHIMIQUE DES POUDRES BROYEES DURANT 30 MINUTES.....	62
FIGURE 3.24: BRASAGE DE DEUX PLAQUES AVEC UN METAL D'APPORT EN POUDRE ALCu BROYEE.....	63
FIGURE 3.25: PASTILLE ALCu OBTENUE APRES L'OPERATION DE COMPACTAGE.....	64
FIGURE 3.26: MONTAGE POUR REALISER LA BRASURE AU FOUR.	65
FIGURE 3.27: COULEE DES DIFFERENTES COMPOSITIONS DES ALLIAGES ZNAl.	67
FIGURE 3.28: ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA FUSION 2.....	67
FIGURE 3.29: MONTAGE POUR LE BRASAGE AU FOUR.	68
FIGURE 3.30: COUPE TRANSVERSALE DU BRASAGE AVEC LA FUSION 3 SUR ACIER-CUIVRE.....	69
FIGURE 3.31: COUPE TRANSVERSALE DU BRASAGE AVEC LA FUSION 3 SUR ACIER-ACIER.....	70
FIGURE 3.32: ALLIAGE COULE DE ZNAlSn PRODUIT A PARTIR DE LA FUSION 4.....	71
FIGURE 3.33: L'OBSERVATION MICROSCOPIQUE DE BRASAGE AVEC FUSION 5.	71

LISTE DES TABLEAU

TABLE 1.1: LES DIFFERENTS TYPES DE BRASURE FORTE.....	3
TABLE 1.2: EXEMPLES D'APPLICATIONS DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION.....	10
TABLE 1.3: LES CLASSIFICATIONS STANDARD DES METAUX D'APPORT ET LES APPLICATIONS POUR CHACUN.	25
TABLE 2.1: CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA MACHINE D'INDUCTION.	35
TABLE 2.2: INFORMATIONS TECHNIQUES DU FOUR A MOUFLE.....	37
TABLE 3.1: : PARAMETRES OPERATOIRES DU BRASAGE PAR CHAUFFAGE PAR INDUCTION.....	49
TABLE 3.2: INFLUENCE DE LA PUISSANCE ELECTROMAGNETIQUE SUR LE TEMPS DE BRASAGE. ...	50
TABLE 3.3: COMPOSITION CHIMIQUE D'UNE BAGUETTE D'ARGENT COMMERCIALE.	53
TABLE 3.4: ANALYSE CHIMIQUE DE LA BAGUETTE 'FAUSSE BRASURE'.	56
TABLE 3.5 : COMPOSITION CHIMIQUE DE LA POUDRE ALLIEE CuAl.	59
TABLE 3.6: PARAMETRES DE BROYAGE MECANIQUE DE LA POUDRE AL66%Cu17%.	60
TABLE 3.7: PROPORTION DES ELEMENTS COMPOSANTS LES COULEES.	66

Abstract

This thesis looks at brazing techniques used to join different metals, such as steel, copper and aluminum. Brazing is a process that enables metal parts to be joined using a filler metal, while preserving the integrity of the base metals.

It begins with an explanation of brazing fundamentals, filler metal types and key parameters to consider. It then explores techniques such as flame and furnace brazing, highlighting their advantages and disadvantages. An experimental section compares various materials and processes. The aim of this thesis is to optimize brazing practices by proposing solutions adapted to the needs of Algerian industry.

Résumé

Ce mémoire se penche sur les techniques de brasage utilisées pour assembler différents métaux, tels que l'acier, le cuivre et l'aluminium. Le brasage est un procédé qui permet de relier des pièces métalliques grâce à un métal d'apport, tout en préservant l'intégrité des métaux de base.

Il débute par une explication des principes fondamentaux du brasage, des types de métaux d'apport et des paramètres clés à considérer. Par la suite, il explore des techniques comme le brasage à la flamme et au four, en mettant en lumière leurs avantages et inconvénients. Une section expérimentale compare divers matériaux et procédés. L'objectif de ce mémoire est d'optimiser les pratiques de brasage en proposant des solutions adaptées aux besoins de l'industrie algérienne.

ملخص

تدرس هذه الأطروحة تقنيات اللحام النحاسي لتجميع المعادن، مثل الفولاذ والنحاس والألمنيوم. اللحام هو عملية تربط بين قطع معدنية باستخدام معدن إضافي، مع الحفاظ على المعادن الأساسي.

يبدأ العمل بشرح مبادئ اللحام النحاسي، وأنواع المعادن الإضافية والمعايير الأساسية. ثم تقدم تقنيات مثل اللحام باللهب وفي الفرن، مع مناقشة مزاياها وقيودها. تتضمن جزءًا تجريبيًا يقارن بين مواد وعمليات مختلفة. يهدف هذا العمل إلى تحسين ممارسات اللحام النحاسي من خلال تقديم حلول مناسبة للصناعة الجزائرية.

INTRODUCTION GENERALE

Le brasage représente une méthode d'assemblage de métaux absolument cruciale dans divers domaines industriels et artisanaux. Cette opération consiste à lier fermement plusieurs éléments métalliques en utilisant un métal d'apport en fusion, sans pour autant provoquer la fonte des métaux de base. On distingue surtout le brasage fort et le brasage tendre, en fonction de la température à laquelle fond le métal d'apport, chacun possédant ses propres spécificités, métaux d'apport et champs d'application.

Dans un environnement industriel qui ne cesse de se transformer, bien maîtriser les techniques de brasage est d'une importance primordiale pour assurer la fiabilité, la longévité et l'efficacité des assemblages métalliques. Les progrès technologiques ont favorisé l'émergence de plusieurs méthodes de brasage, comme le brasage à la flamme, au four, par induction ou par résistance, chacune étant adaptée à des besoins spécifiques et à diverses contraintes de production.

Ce mémoire se positionne dans une démarche d'examen exhaustif et comparatif de ces diverses techniques de brasage appliquées aux métaux courants de l'industrie, tels que l'acier, le cuivre ou l'aluminium. Il a pour but d'analyser les mécanismes essentiels du brasage, d'identifier les paramètres clés ayant une incidence sur la qualité des joints, et de suggérer des solutions concrètes pour optimiser les processus et accroître la fiabilité des assemblages.

Au moyen d'une approche à la fois théorique et expérimentale, ce travail a pour ambition d'offrir une contribution importante à l'amélioration des pratiques industrielles, en prenant en compte les réalités du marché local ainsi que les exigences en matière de performance, de coût et de disponibilité des matériaux.

Chapitre 1

Généralité sur le brasage

1.1 Le brasage

Le brasage consiste à utiliser la chaleur pour assembler au moins deux ou plusieurs pièces en faisant fondre un métal d'apport et un flux et permet d'obtenir un assemblage solide et durable. Si l'opération est réalisée de manière conforme, les métaux de base sont imprégnés du métal d'apport liquéfié par la chaleur. Le métal d'apport se répand et crée l'assemblage. [1]

1.2 Les types de brasage

1.2.1 Le brasage fort

Dans le brasage fort, le métal d'apport présente une température de fusion supérieure à 450° C et pouvant aller jusqu'à 1000° C. La flamme oxy-gaz permet la fusion du métal d'apport, qui par capillarité comble le jeu du joint entre les deux pièces à assembler. Les métaux d'apport les plus couramment employés sont argent, cuivre et aluminium.

Il existe deux grandes familles de brasures fortes.

- La première famille : regroupe les alliages à base Cuivre/Phosphore (avec 2 à 15 % d'argent pour plus de fluidité et tenue des caractéristiques mécaniques à basse température) qui ont la particularité de ne pas nécessiter de décapant externe puisque le phosphore possède des propriétés auto-décapantes sur le cuivre.
- La seconde famille comprend les brasures à base d'Argent, majoritairement à 40%. Le tableau 1 donne les différents types de brasure forte. [2]

Table 1.1: Les différents types de brasure forte.

Alliage brasure forte	Métaux à assembler	Remarques
Cuivre/Phosphore	Cuivre pur ou de plomberie	Le phosphore joue le rôle de décapant. Pas besoin de décapant externe
Cuivre/Phosphore	Alliages cuivreux (laiton)	Nécessité d'utiliser un décapant externe
Cuivre/Phosphore/Argent	Cuivre et alliages	Nécessite un décapant externe, plus fluide grâce à la présence d'argent qui préserve également les caractéristiques

		mécaniques à basse température
Argent 40%	Métaux cuivreux, Aciers	Nécessite un décapant externe, plus fluide et point de fusion inférieur grâce à la forte teneur en argent qui préserve également les caractéristiques mécaniques à basse température.

1.2.1.1 Le domaine d'application

Les principaux domaines d'applications sont, d'une part, dans le bâtiment pour l'assemblage des conduites d'eau ou de gaz, et d'autre part, dans l'industrie pour la fabrication ou la réparation de pièces dans les domaines tels que la chaudronnerie, la tôlerie, la serrurerie et la menuiserie métallique.

Les techniques utilisées dans le brasage fort sont le chalumeau, le four de brasage, l'induction et la résistance électrique. [2]

1.2.2 Le brasage tendre

Dans le brasage tendre, les métaux sont assemblés à l'aide d'un métal d'apport dont le point de fusion est en dessous de 450° C, et inférieur à celui des métaux à braser. La flamme oxy-gaz permet la fusion du métal d'apport, qui par capillarité comble le jeu du joint entre les deux pièces à assembler. Le métal d'apport le plus couramment employé est à base d'étain. [2]

1.2.2.1 Les métaux

Les métaux à assembler par brasage tendre peuvent être très variés : cuivre, laiton, zinc, acier, plomb, aluminium...

Le métal d'apport est généralement un alliage d'étain binaire voire ternaire avec divers métaux comme le plomb, l'argent mais aussi le cuivre, l'antimoine, le bismuth, l'indium, le cadmium, le zinc, l'or... L'alliage le plus couramment utilisé est composé d'environ 60 % d'étain et 40 % de plomb. La teneur en plomb peut cependant varier de 15 à 95% en fonction de l'utilisation envisagée. Les alliages d'apport sont vendus dans le commerce sous des formes diverses (baguettes, tiges, barres, brames, fils, couronnes, pastilles, poudres, crèmes...). [2]

1.2.2.2 Domaine d'application

En fonction de l'utilisation envisagée, les alliages d'apport sont vendus dans le commerce sous des formes diverses (baguettes, tiges, barres, brames, fils, couronnes, pastilles, poudres, crèmes...).

Les techniques utilisées dans le brasage tendre sont le fer électrique, l'étamage, le soudage à la vague et le chalumeau. [2]

1.3 Les techniques de brasage

1.3.1 Brasage au four

Le brasage au four présente l'avantage de pouvoir braser des pièces de tailles importantes et de pouvoir braser plusieurs pièces lors d'une même opération, assurant ainsi une certaine répétabilité dans le procédé. Même si le coût originel des équipements est plus élevé, le brasage au four apparaît très compétitif notamment avec cette potentialité de produire des pièces par lot. En revanche, la problématique de l'atmosphère de brasage est centrale pour ne pas produire des pièces contaminées. [3]

1.3.1.1 Cycle de brasage

Le chauffage est contrôlé par un programme et peut se présenter sous une multitude de formes selon le cas en présence : chauffage linéaire constant, variations de la vitesse de chauffe, chauffage par paliers, etc. Ce dernier cas de chauffage par paliers est généralement utilisé pour supprimer le risque de surchauffe. En effet, en raison de l'inertie thermique il existe un décalage entre la température programmée et la température effective à l'intérieur du four. Ceci peut alors conduire à dépasser la température souhaitée lorsque le chauffage s'arrête. Les différents paliers placés pendant le chauffage, typiquement d'une durée d'une dizaine de minutes, permettent l'homogénéisation de la température dans l'ensemble du four mais sont surtout introduits en dessous de la température de fusion du métal d'apport pour éviter toute fusion prématurée de ce dernier dans le cycle.

Lorsque la température de brasage est atteinte, le four est maintenu à cette température pour une durée correspondant à la durée de brasage (ou temps de brasage). La durée est généralement définie en fonction des caractéristiques du joint que l'on désire obtenir. Plus la durée de brasage sera longue et plus la diffusion des éléments sera facilitée, entraînant le développement certaines microstructures dans le joint. Macroscopiquement, il s'agira général d'avantage de la largeur du joint finale désirée.

Enfin, le cycle de brasage se conclut par le refroidissement du four, permettant ainsi au joint de se solidifier. Comme dans le cas du chauffage en début de cycle, le refroidissement du four peut lui aussi être contrôlé selon des programmes définis, ou bien dans certains cas, suivre un refroidissement naturel [3]

1.3.1.2 Température de brasage

La température de brasage est un paramètre critique lors du brasage. Elle a une grande importance tant au niveau de la mouillabilité du métal d'apport que de la diffusion des

éléments. La plage de températures de brasage envisageables se situe au-dessus de la température de fusion du métal d'apport et en dessous de celle du métal de base. Suivant ces contraintes, la température la plus basse possible est choisie et ce pour deux raisons principales : d'une part cela nécessite moins d'énergie, et ça permet d'autre part de réduire les impacts de la montée en température sur les matériaux de base [3].

En effet, l'augmentation de la température peut entraîner certains changements de microstructure et en particulier augmenter la taille des grains, ce qui en dégraderait certaines caractéristiques mécaniques.

1.3.1.3 Durée de brasage

La durée de brasage est un paramètre éminemment important dont le choix se fait en regard de nombreux facteurs. Le temps de brasage dirige directement le phénomène de diffusion. Ainsi, plus le temps augmente, plus la diffusion est importante, ayant pour conséquence première l'augmentation de la distance que parcourent les atomes lors du brasage. Une durée suffisamment importante facilitera donc la disparition du métal d'apport se trouvant entre les plaques de base grâce à la diffusion des éléments vers ces dernières. De plus, l'homogénéité de la composition chimique du joint se voit favoriser lors de l'augmentation du temps de brasage, ayant pour résultat la disparition de certaines phases pouvant fragiliser le joint. Cependant, une durée de brasage excessive peut conduire à modifier de façon trop profonde la structure cristallographique du métal de base, et ce, au détriment d'une microstructure présentant de meilleures caractéristiques mécaniques. Enfin, dans le cas d'applications industrielles, une longue durée de brasage n'est pas souhaitée vis-à-vis des problématiques de coûts et de cadences de fabrication. [3]

1.3.1.4 Atmosphère de brasage

Lors de la montée en température, et plus généralement, pendant le cycle tout entier, de nombreuses réactions chimiques vont avoir lieu et il convient de les maîtriser pour éviter toute réaction indésirable. En effet, à haute température, les éléments composant l'atmosphère interféreront avec les éléments en présence et créeront de nouveaux composés non souhaités, comme par exemple des oxydes. Tous les résidus pouvant se trouver à l'intérieur du four et résultant d'opérations de brasage antérieures sont autant d'hypothétiques candidats à la contamination des joints brasés : le nettoyage du four avant le brasage est donc primordial. Complémentairement au nettoyage, la purge du four par un gaz inerte peut être mise en place, dans le but de remplacer l'air initialement présent par un gaz qui n'interagira pas lors du brasage. L'utilisation d'Argon est très commune dans le cas du brasage. La création d'un vide pendant le cycle est également une solution complémentaire à l'utilisation de la purge.

La création d'un vide à l'intérieur du four permet de limiter la présence de gaz dans le four pouvant entraîner une contamination. Il existe différents niveaux de vide selon la valeur de la pression. Dans le cas du brasage on retiendra en particulier le vide poussé, qui correspond

à des pressions allant de 10^{-3} à 10^{-7} Torr (1 Torr = 133.322 Pa = 0.00133322 Bar). Une séquence de purge suivit de la création d'un vide constitue une excellente solution pour contrôler les gaz présents dans le four et minimiser les risques de contamination. [3]

1.3.2 Brasage par induction

Le chauffage par induction est une méthode électrothermique permettant de chauffer un élément conducteur sans contact direct avec celui-ci. Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie, notamment pour le soudage, le brasage, la fusion, les traitements thermiques etc. C'est ce même procédé qui est utilisé pour les plaques à induction domestiques. [1]

1.3.2.1 Principe de fonctionnement :

Le principe du chauffage par induction est le même que celui du transformateur de puissance, mais ici, la pièce à usiner agit comme un enroulement secondaire à tour unique en court-circuit. L'inducteur, en effet le bobinage primaire, entoure normalement la pièce à usiner et transporte le courant alternatif qui peut être de fréquence relativement basse ou très élevée, la plage étant de 1,0 kHz à environ 1,0 MHz. Des courants correspondants sont générés dans les pièces à usiner, se chauffant en proportion directe de la résistance électrique individuelle du matériau concerné. De plus, les matériaux ferromagnétiques, comme les aciers inoxydables, sont soumis à un échauffement supplémentaire en raison des effets d'hystérésis magnétique. Il est donc évident que l'acier, qui a une résistance électrique élevée, chauffera beaucoup plus rapidement que le cuivre qui a une résistance électrique relativement faible.

C'est un facteur à prendre en compte car l'application de cette connaissance aura un impact majeur sur la conception de l'inducteur qui sera utilisé lorsque des matériaux ayant des résistances électriques différentes doivent être brasés ensemble.

Sa conception devra être telle que l'inducteur génère un motif de chaleur garantissant que la zone de jointure des pièces de l'assemblage atteigne ensemble la température de brasage. Une autre considération est le fait que la profondeur de pénétration du chemin du courant induit, et donc l'étendue de l'effet de chauffage, est directement proportionnelle à la fréquence du courant alternatif. Cet effet signifie que plus la fréquence, du courant induit appliqué, au travail est élevée, plus son effet de chauffage est concentré de plus en plus près de la surface du matériau chauffé. Ainsi, si l'on doit chauffer un composant relativement épais, par exemple un trépan de roche (voir Figure 1.1 a et b) ayant un diamètre de 2.54 cm, la fréquence appliquée doit être basse, mais la puissance appliquée relativement élevée. En adoptant ces paramètres dans ce cas, on s'assurera que le foret sera chauffé sur l'ensemble de son diamètre tout en générant un gradient de température dans l'assemblage qui sera à son plus frais dans le centre du foret et le plus chaud à sa surface extérieure. En conséquence, l'effet de chauffage d'un courant induit peut-être représenté par la formule simple : [1]

$$H \propto I^2 R. [1]$$

H = chaleur induite dans la pièce à usiner.

α = directement proportionnel à.

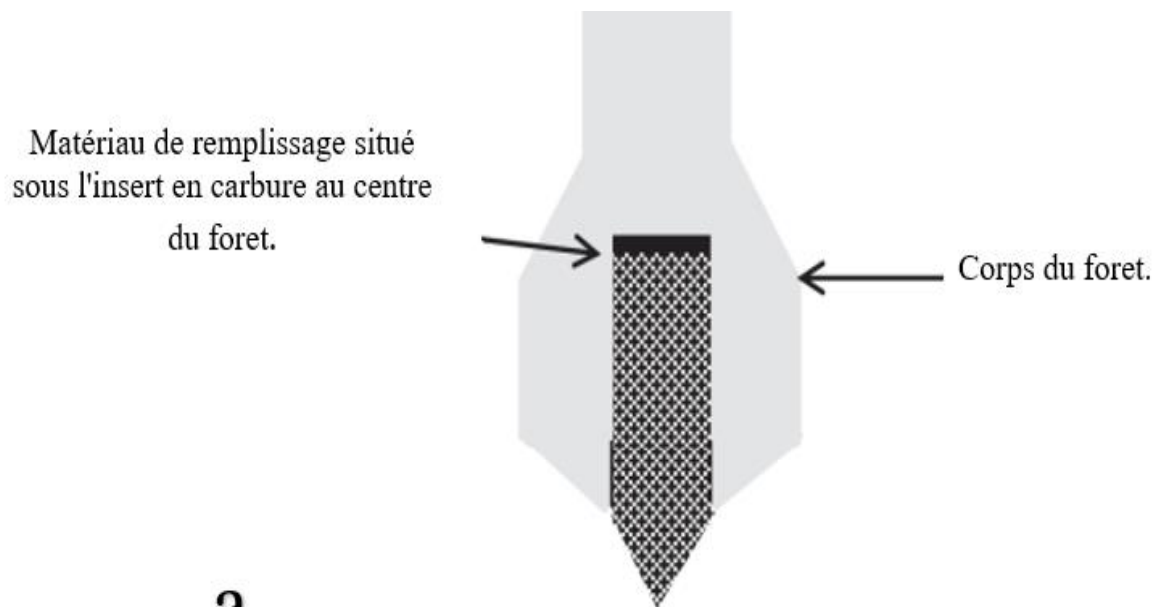
I = quantité de courant induit dans la pièce de travail.

R = résistance électrique de la pièce à travailler.

Il est d'usage d'organiser les choses de manière à ce que, lors du chauffage pour le brasage par induction, l'inducteur porteur de courant entoure la zone de joint.

Si de plus la bobine est positionnée de manière à être équidistante des deux composants à braser, d'après les formules montrées ci-dessus, il en découle automatiquement que dans la situation illustrée à la Figure 1.2, un matériau ayant une haute résistance électrique, comme l'acier par exemple, chauffera beaucoup plus rapidement qu'un matériau ayant une faible résistance électrique tel que le cuivre, le laiton ou l'aluminium.

Ce facteur explique pourquoi les tentatives de brasage de l'acier avec du laiton ou du cuivre par induction peuvent être assez problématiques. [1]



a

La roche en cours de forage

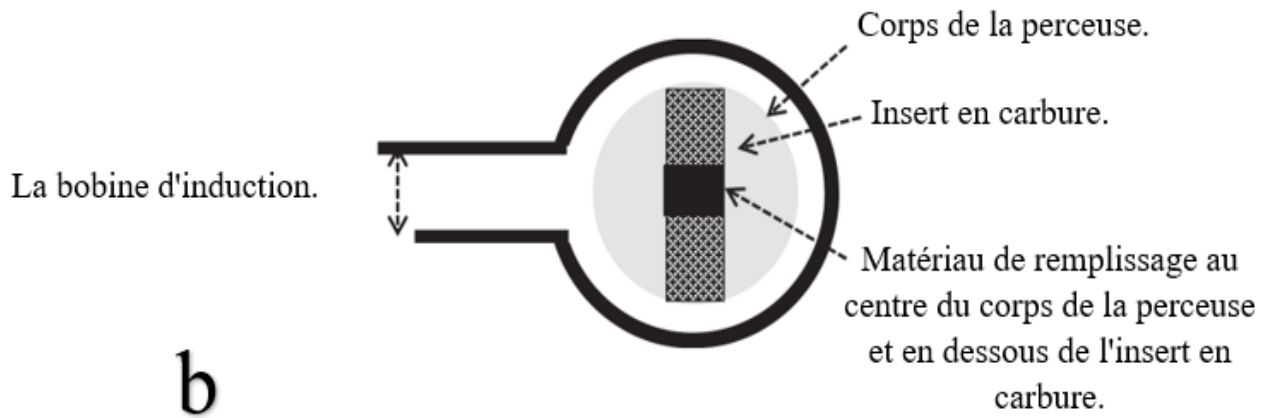


Figure 1.1 : Principe de chauffage par induction.

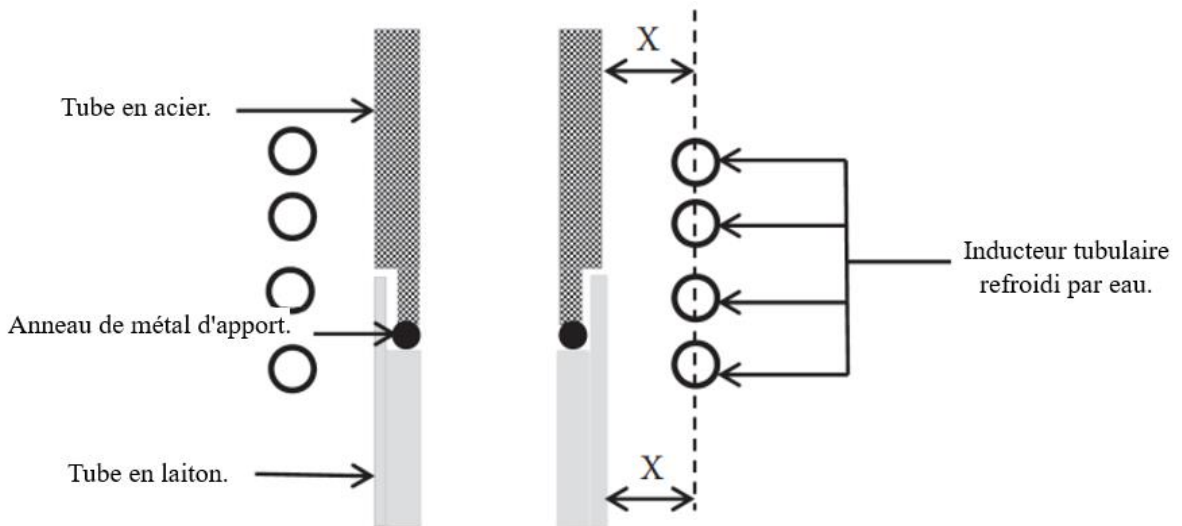


Figure 1.2 : Principe de chauffage par induction.

1.3.2.2 Applications

Le chauffage par induction ne s'applique qu'aux matériaux conducteurs ayant une conductivité électrique comprise entre 10 S/m et 108 S/m. La profondeur de pénétration du champ pour un matériau donné est inversement proportionnelle à la racine carrée de la

fréquence et varie de quelques micromètres à plusieurs centimètres (voir tableau 1.2). De même, les puissances mises en œuvre peuvent varier de quelques centaines de watts (petits fours à induction de laboratoire ou de prothésiste dentaire) à plusieurs mégawatts pour les grosses installations de fusion.

On trouve principalement des installations de chauffage par induction dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique : fusion, chauffage avant formage, traitement thermique (trempe)...

Cependant, grâce à l'évolution des technologies de l'électronique et à l'apparition de composants de commutation plus rapides, des applications sont apparues dans d'autres domaines tels que la chimie (fusion directe de verres et d'oxydes...) et l'industrie agroalimentaire.

Ces installations génèrent des champs magnétiques prépondérants à proximité de l'inducteur et des câbles d'alimentation électrique. Ces champs sont d'autant plus importants que l'intensité du courant parcourant l'inducteur est élevée.

Le tableau 2 quelques exemples d'applications du chauffage par induction. [1]

Table 1.2: Exemples d'applications du chauffage par induction.

Type de chauffage	Fréquences	Applications
Pénétrant	1 Hz à quelques kHz (0,1 à 5 MHz pour les semi-conducteurs)	Forge, fusion
Superficiel	10 à 500 kHz	Trempe superficielle, brasage
Pelliculaire	10 à 1 000 kHz	Soudage des tubes, scellement thermique

1.3.2.3 Formes d'inducteur couramment utilisées

Comme mentionné précédemment, la « partie active » d'un système de chauffage par induction est connue sous le nom de bobine, bobine de travail et fréquemment comme l'inducteur. Le terme « inducteur » est sans doute le meilleur des trois. C'est parce que des

formes autres que les bobines sont très souvent utilisées. Les figures 1.3 et 1.4 montrent un certain nombre de conceptions d'inducteurs couramment utilisées.

Dans le cas des inducteurs multi-tours, ceux qui entourent l'assemblage sont de loin les plus efficaces en termes de vitesse de chauffage. Par conséquent, il est recommandé aux concepteurs de déterminer, si cela est une réalité pratique, de disposer les assemblages à braser par chauffage inductif à l'intérieur de l'inducteur. La raison en est montrée à la Figure 1.5.

Pour s'assurer que la dissipation d'une quantité appréciable d'énergie électrique soit maintenue au minimum, il est nécessaire d'empêcher l'inducteur lui-même de chauffer pendant le temps où le courant le traverse. Cela est généralement prévu en fabriquant la bobine à partir de tubes en cuivre et en la refroidissant en faisant passer de l'eau à travers en continu pendant que la machine est en fonctionnement. Dans de nombreux cas, les tubes ayant une section circulaire sont idéaux, mais dans les cas où l'inducteur doit être très proche du travail ou où une efficacité de refroidissement maximale est essentielle (par exemple lorsque l'inducteur est situé à l'intérieur de la pièce), un tube à section carrée ou de type bourdon peut être utilisé comme inducteur transportant l'eau.

Cependant, dans les cas où la hauteur d'un inducteur en forme de bobine doit être considérablement supérieure à son diamètre, cela pourrait impliquer des manipulations difficiles du tube, ce qui pourrait entraîner un débit d'eau insuffisant pour un refroidissement efficace, en raison de la petite section transversale du tube transportant l'eau. Dans cette situation, on pourrait constater que l'inducteur n'était pas capable de gérer le courant nécessaire. Il faut également se rappeler qu'en raison des effets d'auto-induction, il y aurait une perte d'efficacité. Une méthode alternative de construction d'inducteurs à tour unique est montrée à la Figure 1.6, ainsi que la méthode de refroidissement à l'eau adéquate présentée dans les parties b et c.

Une fabrication à partir de tige ou de feuille de cuivre massif de section relativement épaisse est d'une importance considérable lorsque des inducteurs en série, utilisés pour braser plusieurs assemblages simultanément, sont nécessaires. Une telle méthode de construction facilite souvent un chargement et un déchargement plus rapides. [1]

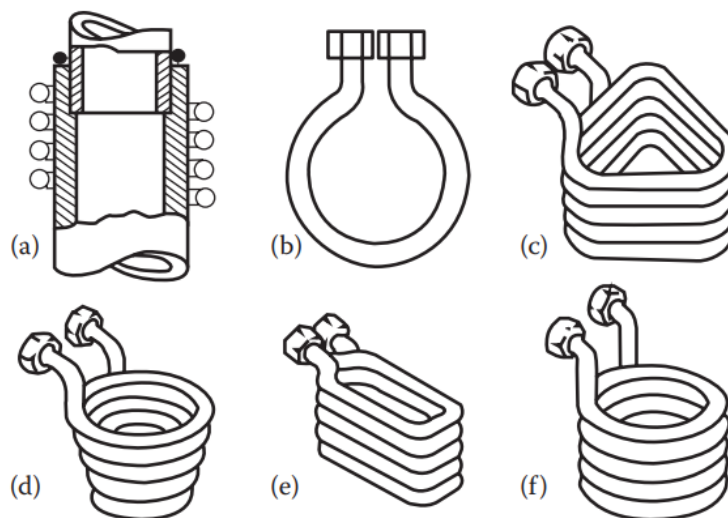


Figure 1.3 : Conceptions de bobines populaires pour le chauffage externe.

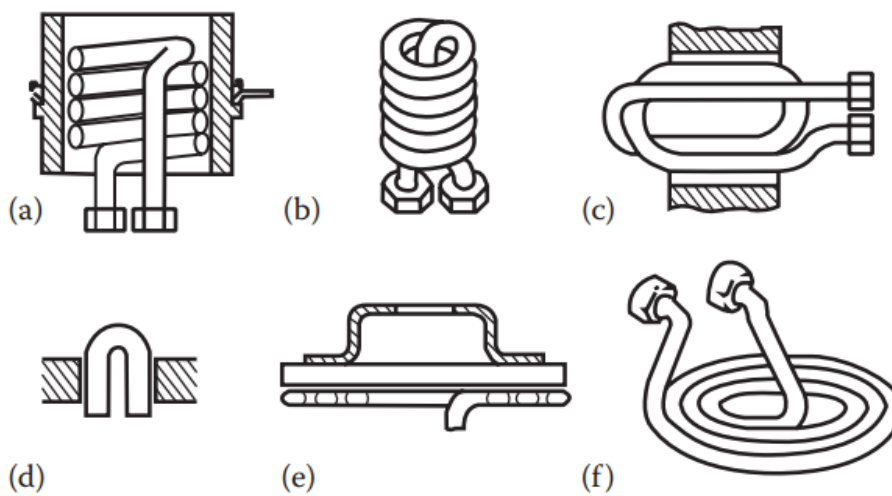


FIGURE 1.4 : INDUCTEURS POUR LE CHAUFFAGE INTERNE ET LES SURFACES PLANES.

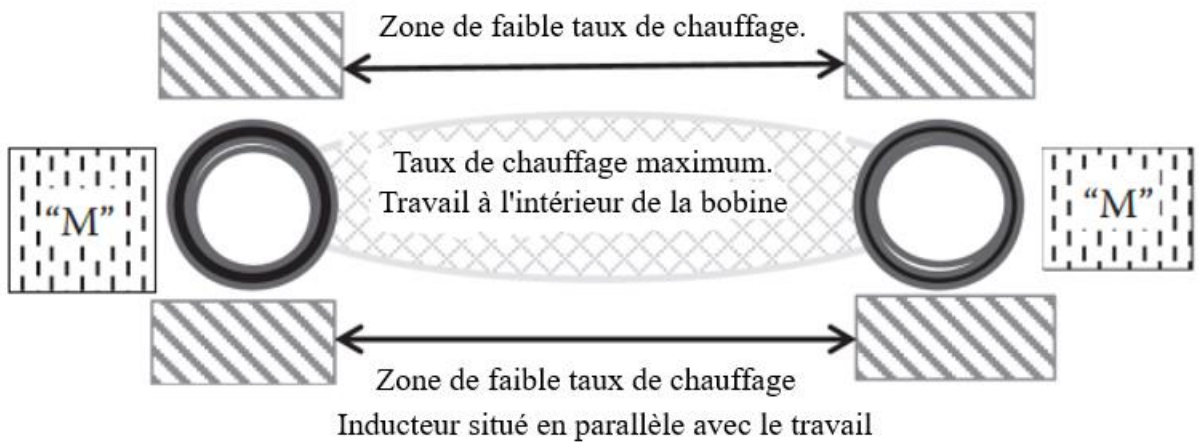


Figure 1.5: Efficacité du chauffage à proximité d'un inducteur.

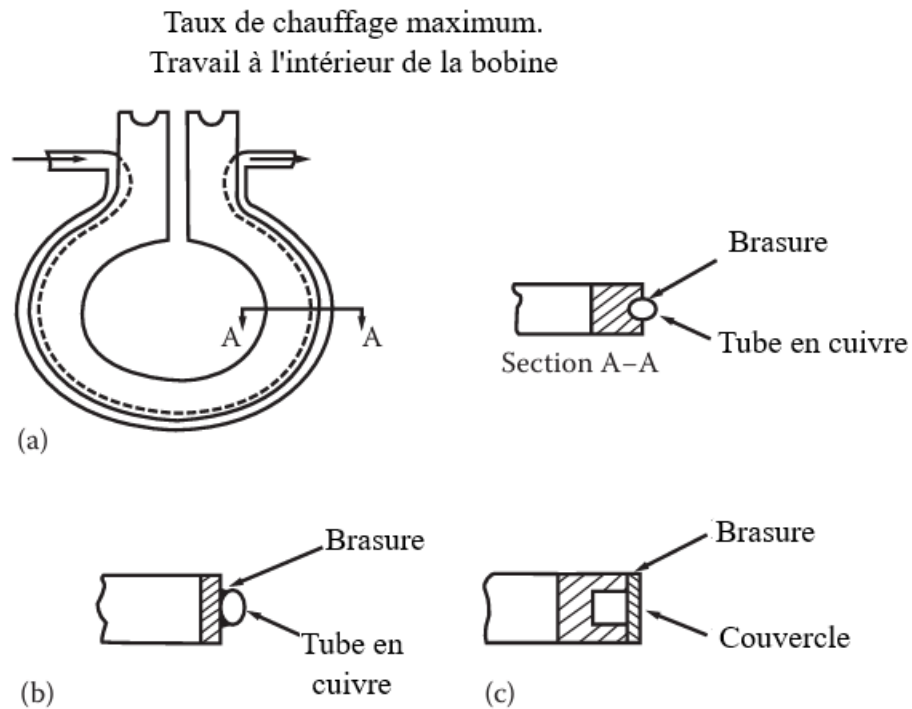


Figure 1.6: Formes fabriquées et usinées d'un inducteur solide à tour unique et les moyens de fournir le refroidissement par eau nécessaire. (a) Bobine à tour unique et (b) et (c) construction et refroidissement alternatifs.

1.3.2.4 Les métaux à assembler

Le brasage par induction est une excellente méthode pour assembler des métaux dissemblables tels que l'acier et le cuivre, le laiton et le cuivre, et l'acier et le laiton. Le brasage par induction est considéré comme bénéfique pour l'assemblage des aciers lorsque le soudage n'est pas approprié. Un joint d'acier brasé par induction bien conçu permet de réduire les contraintes et les distorsions tout en préservant l'intégrité de la pièce. Le brasage par induction permet de braser divers matériaux, y compris des métaux ferreux et même non ferreux. L'acier inoxydable, l'aluminium, le cobalt, le nickel, le carbure, le tungstène, le chrome, le diamant, les métaux nobles et les stellites peuvent être brasés par chauffage par induction. Cette technique d'assemblage permet de créer plusieurs types de joints : un joint d'aboutage pour les plaques plates et les pièces tubulaires, un joint de recouvrement pour les plaques plates et les pièces tubulaires, et un joint de recouvrement d'aboutage pour les plaques plates. [4]

1.3.3 Le brasage a la flamme (au chalumeau)

Le brasage manuel au chalumeau est la méthode la plus fréquemment utilisée pour les réparations, les travaux de brasage uniques et les petites séries de production comme alternative au soudage par fusion. Chauffer l'assemblage avec une flamme de gaz (oxycoupage), soit avec un chalumeau à main, soit avec des brûleurs montés sur machine.

Le flux est normalement requis avec le processus. Une exception est le soudage du métal de base en cuivre pur avec un métal d'apport contenant du phosphore. Le phosphore se lie aux oxydes à la surface pour favoriser l'humidité du métal d'apport.

Le brasage au chalumeau est largement utilisé en raison de son coût relativement bas et de sa portabilité. La flamme est générée par la combustion d'une combinaison d'oxygène et d'un gaz combustible. Le même équipement peut être utilisé que pour le soudage oxyacétylénique. Le processus se prête à l'utilisation de métaux d'apport à bas point de fusion, qui possèdent d'excellentes caractéristiques d'écoulement. [1]

1.3.3.1 La torche

Le brasage au chalumeau utilise le même type de chalumeau, de commandes et de gaz que ceux utilisés pour le découpage et le soudage au gaz. Pour braser, l'opérateur utilise une buse de brasage.

Dans la torche oxyacétylénique, le gaz combustible et l'oxygène circulent dans des tubes séparés et se combinent dans une chambre de mélange, puis passent à travers la buse de la torche avant de s'enflammer. Le fût extérieur de la poignée est souvent cannelé ou embossé

pour offrir une bonne prise. La torche typique mesure de 305 à 600 mm de long et pèse de 1,38 à 2,76 kg. Les poignées sont en laiton ou en aluminium et en acier inoxydable ; les buses sont en alliages de cuivre.

Ajuster le débit de gaz modifie le mélange de gaz pour obtenir la flamme souhaitée. Les mélangeurs à pression égale, utilisés avec du gaz combustible au-dessus de 13,7 kPa (2 psi), reçoivent le gaz combustible et l'oxygène à des pressions presque égales pour produire une flamme neutre. Le chalumeau basse pression ou de type injecteur, pour les faibles pressions de gaz combustible, reçoit de l'oxygène à 69 à 207 kPa (10 à 30 psi); le gaz combustible est aspiré dans la chambre de mélange. Les torches à injecteur existent en versions pour des gaz spécifiques et des plages de pression. [1]

1.3.3.2 Buses de chalumeau

Les braseurs équipent les torches avec des buses de plus grand diamètre que celles utilisées pour le soudage. Le style de la buse varie en fonction du gaz combustible et de type du brasage ,avec de l'acétylène nécessite une buse avec une face d'orifice carrée; les orifices des buses pour le gaz naturel et le propane sont en retrait . [1]

1.3.4 Brasage par immersion

Le brasage par immersion est un procédé de fabrication métallique qui consiste à assembler des surfaces métalliques en immergeant un composant pré-assemblé contenant un alliage de brasage dans un bain fondu du flux. Ce processus utilise l'action capillaire pour tirer l'alliage de brasage fondu entre les pièces étroitement ajustées, formant une liaison thermique et mécanique solide et permanente lorsqu'il refroidit.

Le brasage par immersion permet d'assembler efficacement les surfaces métalliques sur plusieurs plans en une seule opération de 60 secondes, ce qui simplifie l'assemblage par rapport au processus de soudage en plusieurs étapes, qui nécessite une planification structurelle minutieuse et du temps supplémentaire.

Les applications de refroidissement liquide ou les applications sensibles qui nécessitent un nettoyage méticuleux sont mieux adaptées au brasage sous vide ou au soudage. Le brasage par immersion peut laisser du flux résider dans des cavités plus petites qui peuvent être difficiles à évacuer dans des assemblages complexes, ce qui présente des risques pour les appareils électroniques sensibles.

Le brasage par immersion est un processus de fabrication essentiel pour une variété de produits et d'applications qui nécessitent une durabilité et une fiabilité élevées. Le brasage par immersion crée des joints robustes et fiables, essentiels pour maximiser les

performances et la longévité dans des industries telles que l'aérospatiale, la défense, l'automobile et l'électronique. Sa polyvalence et sa fiabilité le rendent indispensable pour fabriquer rapidement et rapidement des composants métalliques complexes avec une grande fiabilité. [5]

1.3.4.1 Métaux de base

Alliages d'aluminium : Idéal pour l'aluminium et ses alliages en raison de sa compatibilité et de ses basses températures de fusion.

Alliages de cuivre : Convient pour le brasage de composants en cuivre, en laiton et en bronze. Acier : Utilisé pour une variété d'applications nécessitant des joints robustes et durables.

Inox : Offre une résistance à la corrosion et une résistance, généralement brasé pour les applications critiques.

Alliages de nickel : Convient aux matériaux à haute température tels que l'acier inoxydable et les alliages de nickel.

Alliages de titane : Utilisé dans l'aérospatiale et d'autres industries où des joints légers et à haute résistance sont nécessaires.

Alliages de magnésium : Couramment brasé pour les applications nécessitant des composants légers. [5]

1.3.4.2 Alliages de brasage

Alliages à base d'aluminium : Spécialement conçu pour le brasage de l'aluminium et de ses alliages, avec de basses températures de fusion et une excellente compatibilité.

Alliages à base d'argent : Polyvalent et largement utilisé pour assembler des composants en acier, en acier inoxydable, en cuivre et en laiton.

Alliages à base de cuivre : Souvent choisi pour le brasage de composants en cuivre, en laiton et en bronze, offrant une bonne résistance et conductivité.

Alliages à base de nickel : Convient pour assembler des matériaux à haute température tels que l'acier inoxydable et les alliages de nickel, fournissant des joints solides et durables. [5]

1.3.4.3 Flux

L'installation de brasage par immersion à grande échelle de Boyd ne maintient qu'un seul flux à base de chlorure. D'autres installations de brasage par immersion peuvent utiliser différents flux, en fonction du parent et des alliages de brasage.

Fondants à base de borax : Couramment utilisé pour l'aluminium et les alliages d'aluminium, facilitant l'élimination des oxydes et assurant un bon mouillage de l'alliage de brasage.

Flux à base de fluorure : Efficace pour le brasage de l'acier inoxydable et d'autres alliages à haute température, aidant à l'élimination des contaminants de surface et favorisant une bonne circulation de l'alliage.

Flux à base de chlorure : Convient pour le brasage de composants en cuivre et en laiton, aidant à l'élimination des oxydes et assurant des joints solides et propres.

Ces matériaux sont soigneusement sélectionnés en fonction de facteurs tels que la compatibilité des métaux de base, les conditions de fonctionnement et les exigences spécifiques de l'application, garantissant des performances et une fiabilité optimale dans les processus de brasage par immersion. [5]

1.3.4.4 Processus de brasage par immersion

Le processus de brasage par immersion se compose d'une série d'étapes méticuleuses visant à obtenir des liaisons solides et fiables entre les composants métalliques. Chaque étape contribue à assurer la qualité et l'intégrité de l'assemblage final. De la préparation de la surface au nettoyage, nous orchestrans soigneusement chaque étape pour faciliter l'écoulement de l'alliage de brasage fondu et créer des joints robustes.

Préparer l'Assemblée : Enlevez la graisse, l'huile, les oxydes et le tartre des surfaces des composants pour assurer un bon mouillage de l'alliage.

Sélectionner et positionner le métal d'apport de brasage : Choisissez le métal d'apport de brasage approprié, en vous assurant qu'il entre en contact avec tous les métaux assemblés.

Fixation de l'ensemble : Utilisez des fixations pour maintenir les pièces assemblées en place pendant le brasage, à l'aide de tiges, de crochets ou de paniers.

Préchauffez l'assemblage : Chauffez les composants assemblés juste en dessous du point de fusion du métal d'apport pour minimiser le temps de four et assurer un chauffage uniforme.

Effectuer le brasage : Déplacez l'assemblage du préchauffage et plongez-le dans le four de brasage par immersion pendant une durée spécifique, permettant à l'alliage de brasage de s'écouler à travers le joint par capillarité.

Éteindre l'Assemblée : Après le brasage, refroidissez rapidement les pièces à une température plus basse pour recuire l'ensemble et définir les propriétés mécaniques du matériau. Boyd peut utiliser l'air, le brouillard ou l'immersion pour tremper les assemblages brasés par immersion.

Nettoyez l'ensemble : Éliminez les résidus de flux des composants à l'aide de méthodes de nettoyage chimiques pour assurer un assemblage fini propre.

Âge de l'Assemblée : La pièce est vieillie artificiellement dans un four pour verrouiller les propriétés mécaniques définies lors de l'opération de trempe. [5]

1.3.4.5 Considérations clés pour le brasage par immersion

Pour réussir le brasage par immersion, plusieurs considérations clés doivent être prises en compte pour garantir des joints solides et fiables. Ce processus implique l'immersion des métaux dans un bain de flux fondu et nécessite une planification méticuleuse. L'attention portée à la compatibilité des matériaux, à la préparation de surface, à la conception des joints, à la conception des montages, à la sélection de l'alliage de brasage, au contrôle de la température, à la sélection du flux, au refroidissement et à la trempe et au contrôle de la qualité est cruciale.

Compatibilité des matériaux : Assurez-vous que les matériaux assemblés sont compatibles avec le processus de brasage et l'alliage de brasage. Tenez compte des points de fusion, des coefficients de dilatation thermique et des compositions chimiques des métaux de base et de l'apport de brasage.

Préparation de la surface : Un nettoyage et une préparation de surface appropriés sont essentiels pour un brasage réussi. Retirez tous les contaminants, tels que les huiles, les oxydes ou les revêtements, des surfaces à assembler pour favoriser un bon mouillage et une bonne adhérence de l'alliage de brasage.

Conception des articulations : Concevoir le joint de manière à faciliter l'action capillaire et à assurer le bon écoulement de l'alliage de brasage. Des ajustements serrés, des tailles d'espace appropriées et la géométrie des joints favorisent l'écoulement capillaire pour des joints plus solides et plus fiables.

Conception du luminaire : Utilisez des fixations pour maintenir les pièces dans la bonne position pendant le brasage et éviter la distorsion ou le désalignement. Concevoir des montages pour résister aux contraintes thermiques du processus de brasage et fournir un support adéquat aux pièces.

Sélection de l'alliage de brasage : Choisissez le bon alliage de brasage pour obtenir les propriétés souhaitées dans l'assemblage. Tenez compte de facteurs tels que la température de fusion, la fluidité, la résistance, la résistance à la corrosion et la compatibilité avec les métaux de base.

Contrôle de la température : Le maintien d'un contrôle précis de la température de brasage garantit un mouillage et un collage corrects de l'alliage de brasage sans surchauffer les métaux de base. Assurez l'uniformité de la température dans tout l'ensemble pour éviter une surchauffe ou une sous-chauffe localisée.

Sélection de flux : Sélectionnez le flux approprié pour l'application en fonction des matériaux et des alliages de brasage. Assurez-vous que le bain flux est chauffé uniformément à la température requise en fonction des matériaux à braser.

Refroidissement et trempe : Le refroidissement et la trempe contrôlés après le brasage solidifient l'alliage de brasage, empêchant la formation de phases métallurgiques indésirables. Utilisez des vitesses de refroidissement contrôlées pour minimiser les contraintes résiduelles dans l'assemblage et réduire le risque de distorsion.

Contrôle de la qualité et inspection : L'inspection régulière des joints brasés pour détecter des défauts tels qu'une pénétration incomplète, des vides, des fissures ou un excès de métal d'apport est cruciale pour garantir la qualité et l'intégrité de l'assemblage. Utiliser des méthodes d'essai non destructives telles que l'inspection visuelle, l'essai d'étanchéité, l'essai de ressuage ou l'inspection par rayons X dans le cadre du processus de contrôle de la qualité.

Chacun de ces facteurs joue un rôle essentiel dans l'obtention des résultats souhaités et le maintien de l'intégrité structurelle des composants assemblés. [5]

1.3.5 Brasage à la vague

Voici un procédé qui est bien adapté pour braser un grand nombre de joints à grande vitesse et qui est pour cela répandu dans la production de joints brases dans la microélectronique. Les circuits imprimés sont équipés avec les composants qui sont collés sur le circuit imprimé et sont faits passer par une vague de métal d'apport liquide. Le métal mouille en même temps le contact du composant et la métallisation du contact et est tenu par des forces capillaires à cet endroit où ensuite il solidifie. Il pose des problèmes notamment quand la distance entre les connecteurs devient très petite, car ceci engendre de court-circuit entre les différentiels connecteurs. En outre, la nature non mouillante de certains composants, notamment de ceux plastique et en céramique crée un effet d'ombre, ce qui donne lieu à une préférence d'orientation des différents composants par rapport à la direction de l'avancement du bord, nécessite des contacts plus larges et limite la densité de composants, paramètre qui est très important pour la miniaturisation dans la microélectronique. [6]

1.3.5.1 Étapes du processus de brasage à la vague

Le processus de brasage à la vague comprend cinq étapes fondamentales : la fusion de la soudure, le nettoyage des composants, le placement du PCB, le brasage et le nettoyage. Chaque étape joue un rôle crucial pour garantir la qualité et la fiabilité des joints de soudure.

Étape 1 : Fusion de la soudure

Au cœur du processus de brasage à la vague se trouve le contrôle précis de la température du réservoir de soudure, généralement comprise entre 180 et 450 °C, selon le type de soudure et le modèle de machine. Ce contrôle de la température est primordial, car il garantit que la soudure atteint son état optimal, garantissant pureté et efficacité. Le maintien d'un contrôle précis de la température est essentiel pour obtenir une cohérence, une douceur et des résultats de soudure supérieurs tout au long du processus.

Étape 2 : Nettoyage des composants

Au cours de cette étape critique, les composants subissent un nettoyage minutieux pour éliminer toute couche d'oxyde. La présence de couches d'oxyde peut compromettre la qualité du brasage, ce qui rend impératif d'y remédier rapidement. Pour faciliter ce processus de nettoyage et améliorer le mouillage de la soudure, un produit chimique spécialisé appelé flux est utilisé. Le flux PCB est un mélange bien conçu de matériaux de base et d'activateurs conçus pour éliminer les oxydes des surfaces métalliques et favoriser un mouillage supérieur de la soudure.

Étape 3 : Placement du PCB

Un positionnement et une fixation précis des composants sur le circuit imprimé sont essentiels à cette étape. Les planches assemblées sont soigneusement placées dans la machine, assurant un alignement précis avec la bande transporteuse à un angle de 0°. Des fermoirs métalliques robustes maintiennent le circuit imprimé solidement en place tout au long du processus de soudure, garantissant des résultats de soudure optimaux en maintenant la position et l'alignement de la carte.

Étape 4: Soudure

Cette phase est au cœur du processus de soudage, où l'objectif de souder efficacement les composants du PCB sur le circuit imprimé est atteint. La bande transporteuse propulse régulièrement la carte vers l'avant, la rapprochant du bac à souder. Le contrôle de la vitesse de la bande transporteuse est crucial, car un mouvement lent et délibéré permet à l'excès de soudure de refluer dans le bain de soudure. Ce rythme délibéré favorise une couverture complète des soudures, garantissant des connexions sécurisées et fiables.

Étape 5 : nettoyage

La dernière étape se concentre sur le nettoyage et le raffinement du produit. Une procédure de nettoyage méticuleuse est utilisée pour garantir que le circuit imprimé est exempt de flux résiduel. Divers solvants et eau déminéralisée sont utilisés pour laver soigneusement le panneau, en éliminant tous les résidus de flux restants. L'alcool isopropylique, en raison

de son prix abordable et de sa nature non toxique, est un solvant généralement préféré pour cette tâche.[6]

1.3.5.2 Avantages et inconvénients du soudage à la vague

Avantages :

Conformité sans plomb : le brasage à la vague convient à l'assemblage de circuits imprimés sans plomb de haute qualité, garantissant la conformité aux réglementations RoHS tout en améliorant l'efficacité de la production.

Aucun masquage requis : contrairement à certaines méthodes de soudage, le soudage à la vague ne nécessite pas de masquage des zones du circuit imprimé qui n'ont pas besoin d'être soudées, ce qui permet de gagner du temps dans le processus.

Rentable : le brasage à la vague offre souvent des avantages en termes de coûts par rapport aux autres techniques de brasage.

Ajustabilité des paramètres : un équipement moderne permet des ajustements précis, garantissant des résultats cohérents et fiables.

Efficacité énergétique : la pulvérisation entraînée par un moteur pas à pas et la conception réglable de la bouche de pulvérisation en étain entraînent 25 % de consommation d'énergie et de matériaux auxiliaires en moins d'une année sur l'autre.

Contrôle précis : le contrôle en boucle fermée du système de transport, le préchauffage précis et le contrôle du temps de soudage contribuent à des joints de soudure de haute qualité.

Oxydation minimale des scories d'étain : près de la crête d'une vague à écoulement plat, très peu d'oxydation des scories d'étain se produit, conduisant à des joints de soudure impeccables.

Désavantages :

Applicabilité limitée aux composants CMS : le brasage à la vague est mieux adapté aux composants traversants avec un espacement des fils plus grand, ce qui rend difficile l'obtention de connexions de soudure fiables avec les composants de dispositifs à montage en surface (CMS).

Dommages potentiels aux composants : les composants CMS, en particulier les circuits intégrés sensibles à la température, peuvent être susceptibles d'être endommagés lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées lors du brasage à la vague, ce qui peut entraîner des problèmes de fonctionnalité ou des dommages permanents.

Dominance du SMT : alors que la taille des composants électroniques continue de diminuer, la technologie de montage en surface (SMT) domine l'industrie en raison de son efficacité dans la gestion des composants plus petits. [6]

1.3.5.3 Applications du brasage à la vague

- a. Industrie électronique.
- b. Composants à montage traversant.
- c. Production de grandes séries. [6]

1.3.6 Brasage par résistance

Le brasage par résistance nécessite un générateur capable de fournir une intensité soutenue sur des temps relativement longs dont un exemple est montré à la figure 1.7 .

Le brasage par résistance s'appuie sur la résistance électrique pour générer de la chaleur à l'interface du joint. Il est couramment utilisé pour les petites pièces et les assemblages, offrant des cycles de chauffage rapides et une grande répétabilité.

Cette méthode est souvent employée dans l'industrie électronique pour assembler des composants tels que des connecteurs et des terminaux.

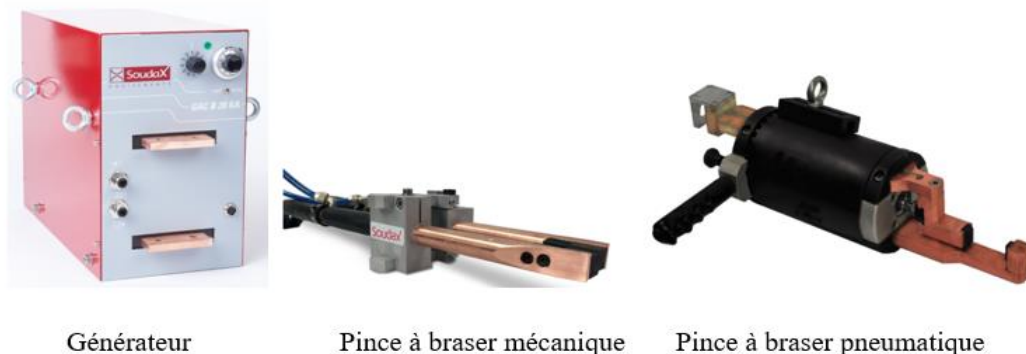


Figure 1.7: Appareil nécessaire pour brasage par résistance.

Dans le soudage par résistance, un courant de basse tension et d'intensité élevée est utilisé comme source de chauffage, comme dans le cas du soudage par points. La pièce à travailler

est maintenue entre les deux électrodes, le métal d'apport étant préchargé au niveau du joint.

Le courant, passant à travers le joint, réchauffe et fait fondre le métal d'apport pour brasage qui se propage autour du joint et passe dans la cavité par capillarité. Le brasage par résistance est normalement utilisé pour le brasage de contacts électriques et pour la fabrication de fils de transformateur en cuivre. Il convient mieux à la production en grande quantité.[7]

1.3.6.1 Processus du brasage par résistance

a. Préparation des pièces :

Les pièces à assembler (souvent les composants électroniques et les pistes sur un PCB) sont placées ensemble, souvent avec une pâte à brasage ou un fil de soudure.

b. Application de courant

Deux électrodes (souvent en cuivre ou en alliage de cuivre) sont placées de part et d'autre de la zone de brasage. Un courant électrique est alors appliqué à travers les pièces à assembler. Ce courant génère de la chaleur par effet Joule, c'est-à-dire que la résistance des matériaux au passage du courant fait chauffer les zones de contact.

c. Fusion de la soudure :

Lorsque la température atteint un certain seuil, la soudure fond, créant une connexion solide entre les composants et la carte. Ce processus est contrôlé de manière précise pour éviter des températures trop élevées qui pourraient endommager les composants.

d. Refroidissement :

Une fois que la soudure a fondu et que la jonction est réalisée, le courant est coupé et les pièces sont laissées à refroidir, solidifiant ainsi la soudure et créant une connexion fiable.

1.3.6.2 Applications du brasage par résistance

- a. Assemblages électroniques
- b. Connecteurs
- c. Batteries.

[7]

1.4 Les métaux d'apport

Le métal d'apport est le terme utilisé en brasage pour décrire l'alliage (ou métal élémentaire) qui forme le joint. C'est placé entre deux (ou plusieurs) composants (les matériaux parents) et ayant un point de fusion inférieur à celui-ci, est fondu et laissé solidifier, formant une jointure dans un assemblage de brasage. La sélection optimisée du métal d'apport dépend d'une multitude de facteurs, y compris ;

- Les matériaux à assembler : compatibilité métallurgique entre les métaux d'apport et les métaux de base.
- Conditions de service : température de fonctionnement et environnement, le type, le niveau et la nature (statique ou dynamique) de chargement mécanique ou la présence de un milieu corrosif (tel qu'un électrolyte permettant corrosion galvanique).
- Conception de joint : propriétés d'écoulement appropriées pour le jeu de joint utilisé
- Processus de brasage : certains métaux d'apport ne sont pas compatibles avec certains processus de brasage (par exemple, les métaux d'apport volatils contenant du zinc dans le brasage sous vide).
- Température de brasage – limitée pour éviter de changer microstructure et propriétés du matériau de base
- Forme du métal d'apport : par exemple, fil, pâte, feuille, etc.
- Exigences et réglementations légales – certains éléments sont interdits dans certaines applications (par exemple les brasures contenant du cadmium ont été interdites dans l'utilisation sur les équipements dans les industries laitière, alimentaire et pharmaceutique même avant l'interdiction européenne généralisée introduite en 2012 [9,10]).
- Toxicité : La présence de certains éléments dans matériaux destinés à des applications biomédicales ne sont pas permis en raison de préoccupations de toxicité ; par exemple, Cu^{2+} au-dessus de 0,5 mM est considéré comme cytotoxique pour les cellules souches mésenchymateuses. [8]

1.4.1 Les classifications standard des métaux d'apport et les applications pour chacun

Table 1.3: Les classifications standard des métaux d'apport et les applications pour chacun.

Désignation de la classe	Applications et fonctionnalités
Classe Al : Aluminium et Magnésium métaux d'apport à base d'aluminium et de magnésium	Assemblage de l'aluminium et de ses alliages Certaines alliages d'Al sont utilisés pour braser le titane. L'alliage Mg001 est utilisé pour braser des alliages de Mg élevés.
Classe Ag : Métaux d'apport à base d'argent.	Métaux d'apport à usage général, utilisés sur les aciers (y compris l'acier inoxydable), le cuivre, les alliages de cuivre (y compris le laiton et le bronze), le nickel, le carbure de tungstène et le diamant polycristallin.
Classe CuP : Métal d'apport de brasage cuivre-phosphore	Assemblage de cuivre et d'alliages de cuivre, et de molybdène. La teneur en phosphore permet l'auto-fluxage lors du brasage du cuivre. Faible ductilité et résistance aux chocs.
Classes Ni : Métaux de remplissage à base de nickel (et cobalt)	Utilisé pour les aciers inoxydables, les superalliages à base de nickel et de cobalt. Les métaux d'apport sont souvent fragiles. Nécessite généralement un vide. Excellente résistance à la corrosion et hautes températures de service.

<p>Classe Pd : Métaux d'apport contenant du palladium</p>	<p>Applications aérospatiales et électroniques, utilisées dans les industries du verre et chimiques. Possèdent une bonne résistance à des températures élevées, une excellente résistance à la corrosion.</p>
<p>Classe Au : Métaux d'apport contenant de l'or</p>	<p>Applications aérospatiales et électroniques, faible teneur en impuretés volatiles pour être adaptées aux dispositifs à tubes à vide. Excellente résistance à la corrosion et résistance à haute température.</p> <p>Les soudures pour bijoux (bien qu'elles ne fassent pas officiellement partie de cette catégorie) sont principalement en or (la principale soudure pour bijoux en or est basée sur Au-AgCu-Zn).</p>

[8]

1.4.2 Familles de métaux d'apport

De nombreux métaux d'apport différents existent et sont fréquemment organisés en familles, (comme dans l'ISO : 1762 : 2016 [13] où les classifications discutées ci-dessous sont établies).

1. Métaux d'apport pour brasage à basse température (classe Al)

Pour les matériaux à basse température de fusion (par exemple, les alliages d'aluminium), le fait qu'un métal d'apport doit avoir une température de fusion inférieure à celle des matériaux qu'il assemble constitue une limitation significative. La plupart des métaux d'apport utilisés pour le brasage de l'aluminium sont basés sur le système aluminium-silicium, le silicium abaissant la température de liquidus à 580–630 °C.

2. Alliages à base d'argent

Les alliages à base d'argent représentent un large segment du marché et sont considérés comme de bons métaux d'apport polyvalents qui (selon d'autres constituants de l'alliage) peuvent mouiller la plupart des métaux d'ingénierie courants, y compris le nickel, le cuivre

(et ses alliages), les aciers à faible teneur en carbone et les aciers faiblement alliés, l'acier inoxydable et le carbure de tungstène. La gamme complète des métaux d'apport à base d'argent selon la norme ISO 17672:2016

3. Alliages cuivre-phosphore et alliages à base de cuivre (Class CuP et Class Cu)

Le cuivre est un composant commun de nombreux métaux d'apport pour brasage, offrant la capacité de mouiller le nickel et (dans une certaine mesure) le fer. Bien que ces systèmes d'alliage soient encore largement utilisés, le développement actuel au sein de cette famille est minimal.

Les alliages cuivre-phosphore sont composés d'une majorité de cuivre et de 5 à 7,5 % en poids de phosphore. D'autres ajouts mineurs incluent l'argent (jusqu'à 20 % en poids) et l'étain (jusqu'à 7,5 % en poids). L'avantage principal des alliages cuivre-phosphore par rapport à d'autres métaux d'apport est que lors du brasage de cuivre pur dans l'air, ils ne nécessitent pas de flux, ce qui entraîne des économies de temps et de coûts. Le phosphore réagit avec l'oxygène atmosphérique pour former du pentoxyde de phosphore, qui réagit avec l'oxyde de cuivre de surface pour former un laitier fusible, qui n'induit également pas de corrosion.

4. Métaux d'apport pour brasage à haute température (classe Ni, classe Pd et classe Au)

Les métaux d'apport à haute température proviennent fréquemment de l'une des trois familles, étant principalement basés sur le nickel (classe Ni), le palladium (classe Pd) ou l'or (classe Au). Aucun alliage répertorié dans l'ISO :1762 :2016 dans l'une de ces trois familles de métaux d'apport n'a une température de solidus inférieure à 800°C, et en tant que tel, ils sont utilisés pour le brasage dans des applications où une haute température de service est requise et où une haute température de traitement peut être tolérée, comme dans les moteurs à réaction et les turbines à gaz. Les classes Pd et Au trouvent également une utilisation significative dans les dispositifs de type tube à vide et dans le jointage métal-céramique. Les pales de turbine en service subissent des températures extrêmement élevées et les métaux d'apport utilisés pour les réparer doivent avoir une température de fonctionnement élevée.

Les métaux d'apport pour brasage à haute température sont largement de deux types d'alliages :

. Systèmes d'alliage eutectique (principalement à base de nickel ou de nickel-chrome) avec de forts dépressants de point de fusion tels que le silicium, le bore et le phosphore. Ils sont utilisés là où des températures de service élevées sont rencontrées et où une bonne résistance à la corrosion est nécessaire, comme dans le brasage de superalliages à base de nickel et de cobalt et d'aciers inoxydables.

Systèmes de solution solide à base de métaux précieux (palladium, or et argent) avec des ajouts de nickel et de cuivre. Ils sont souvent utilisés sur des composants aérospatiaux dans le brasage sous vide ou dans un four à gaz inerte, et possèdent de bonnes propriétés mécaniques à température élevée et une bonne résistance à l'oxydation. La large plage de travail des membres de cette famille en fait un bon choix pour les procédures de brasage par étapes (où plusieurs joints brasés sont nécessaires mais ne peuvent pas être réalisés en une seule opération, et plusieurs étapes de brasage sont effectuées à des températures décroissantes, en utilisant un métal d'apport à point de fusion plus bas à chaque fois). [8]

1.4.3 L'état de la surface

La texture de surface physique affectera le brasage, et cela est décrit par l'orientation de la surface (qui influence la direction d'écoulement du métal d'apport), l'ondulation et la rugosité de surface. Cette dernière, mesure des petites déviations d'une surface matérielle par rapport à la planéité, est l'un des paramètres les plus fréquemment caractérisés dans les joints brasés. La rugosité de surface est considérée comme ayant un impact critique sur la mouillabilité et la qualité des joints brasés, et a été étudiée pour une variété de métaux de base et de matériaux d'apport fondus, avec des résultats différents sur son influence et ses caractéristiques optimales. La plupart des études montrent que, au moins jusqu'à un certain point, des surfaces plus lisses offrent une meilleure mouillabilité et une résistance au cisaillement des joints plus élevée ; des preuves provenant de Cu_{9.7}Sn-5.7Ni-7P sur le cuivre lient une rugosité plus faible à un volume de vide réduit, et une augmentation de la résistance au cisaillement et de l'énergie de surface a été constatée jusqu'à une rugosité de surface moyenne (Ra) de 0,1 µm sur le cuivre. Des travaux sur le brasage de céramiques (alumine, carbure d'hafnium et silice) par du cuivre liquide, du gallium et de l'étain montrent que le rugueux entraîne généralement une diminution de la mouillabilité, et que les angles de contact entre une goutte d'Al fondue et une surface TiN diminuent avec Ra, jusqu'à au moins Ra = 0,3 µm. Des résultats similaires ont également été observés lors du rugueux d'une surface Al₂O₃ métallisée au Cu, ce qui réduit la mouillabilité des soudures Sn-Bi.

Cependant, il existe des preuves du contraire. Hong & Koo ont trouvé une résistance au cisaillement améliorée en raison d'un mouillage accru avec des surfaces rugueuses, jusqu'à un point où la rugosité est telle que seuls les contacts d'aspérité sont liés, avec une Ra optimale de 0,79 µm [24]. De cela, Zaharinie et al. ont conclu qu'une valeur intermédiaire (qu'ils ont choisie comme Ra = 0,2 µm) pourrait être préférable, car la rugosité augmente la surface de l'interface de joint et fournit des chemins capillaires supplémentaires pour l'écoulement du métal d'apport de brasage, jusqu'à un point où l'étalement du métal d'apport devient plus difficile, les aspérités de surface entravant l'écoulement. Des preuves ont

également été rapportées d'une corrélation limitée entre la rugosité et le mouillage, y compris pour les métaux d'apport sur nitrure d'aluminium, et dans des situations où le mouillage est dominé par des réactions chimiques, bien que la gamme des conditions de surface examinées ait été limitée. [8]

Chapitre 2

Méthodologies expérimentales

2.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à la description détaillée des méthodologies expérimentales mises en œuvre dans le cadre de cette étude. Il présente les matériaux sélectionnés, les outils et équipements utilisés ainsi que les procédés appliqués pour la préparation et le traitement des échantillons. Cette approche rigoureuse permet d'assurer la reproductibilité et la fiabilité des résultats obtenus. Nous aborderons successivement les caractéristiques des matériaux d'étude et d'apport, les techniques de chauffage par induction et au chalumeau, ainsi que les procédés de préparation des échantillons, incluant le polissage et le décapage chimique. Ces méthodologies constituent la base expérimentale indispensable pour l'analyse approfondie des phénomènes étudiés dans ce travail.

2.2 Matériaux

2.2.1 Les matériaux d'études

Les matériaux d'études ont été choisis pour leur disponibilité, leur prix et leur utilisation courante dans l'industrie. Ce sont notamment les aciers au carbone, les aciers inoxydables, le cuivre et l'aluminium. Ces matériaux étaient soit sous forme de tôles, soit sous forme de plaques.

La figure 2.1 montre les photos des différents matériaux utilisés.

On a utilisé comme métal de base pour brasage des plaques (en acier ordinaire, cuivre, aluminium et en acier inoxydable) et des tubes (en acier et en cuivre).

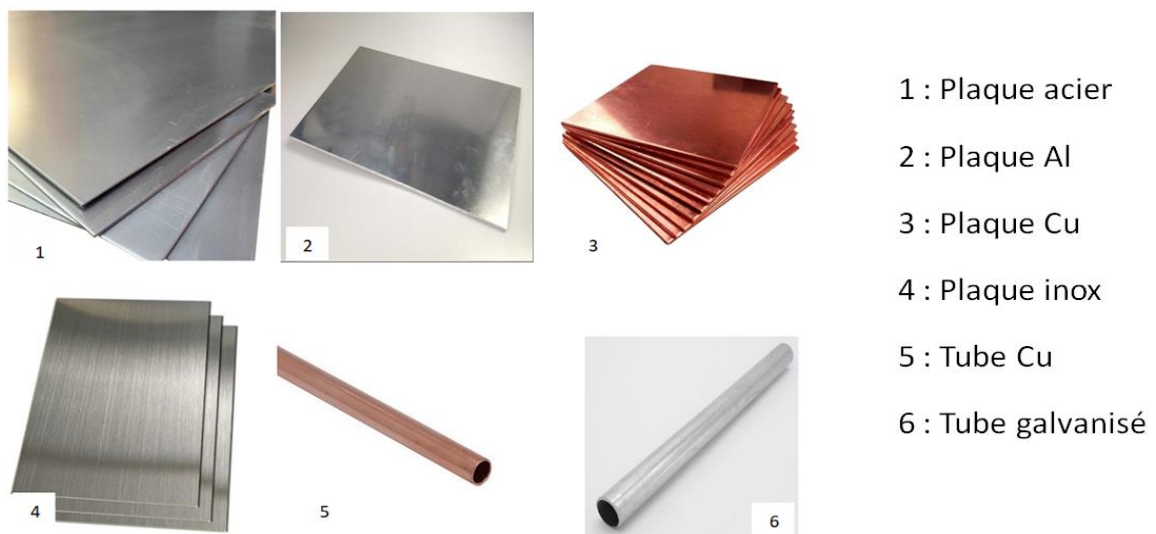


Figure 2.1: Différents matériaux d'études.

Pour l'acier, c'est de l'acier au carbone à environ 0.4 % C. Pour l'aluminium, c'est un alliage de la série 1000. Pour les plaques de cuivre, c'est un cuivre à 99 % pur le reste sont des impuretés (Al, Si Zn Pb), Pour les tubes de cuivre utilisés dans la plomberie, c'est un cuivre à 92 %, de l'oxygène et des oxydes de Cu. L'analyse au spectromètre EDS, montré à la figure 2.2, donne un aperçu de la composition du tube de plomberie de cuivre.

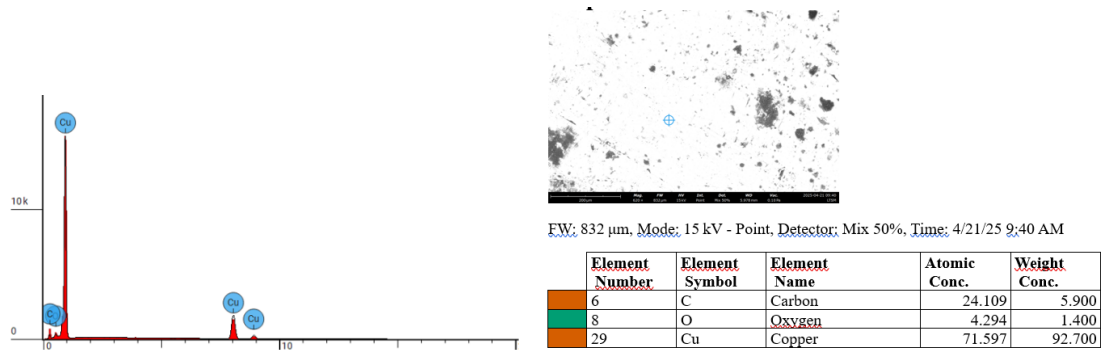


Figure 2.2: Analyse de la composition chimique d'un tube de plomberie.

2.2.2 Matériaux d'apport

2.2.2.1 Baguette d'argent

Nous avons utilisé la baguette d'argent commerciale utilisée couramment dans le brasage des tubes de plomberie notamment ceux destinés à l'installation du gaz naturel dans les édifices publics ou résidentiels.

L'analyse de la composition de la baguette, montrée à la figure 2.3, nous révèle avec surprise que la baguette d'argent est en fait principalement constituée d'un alliage CuZn avec environ 6.5 % en poids atomique d'argent seulement.

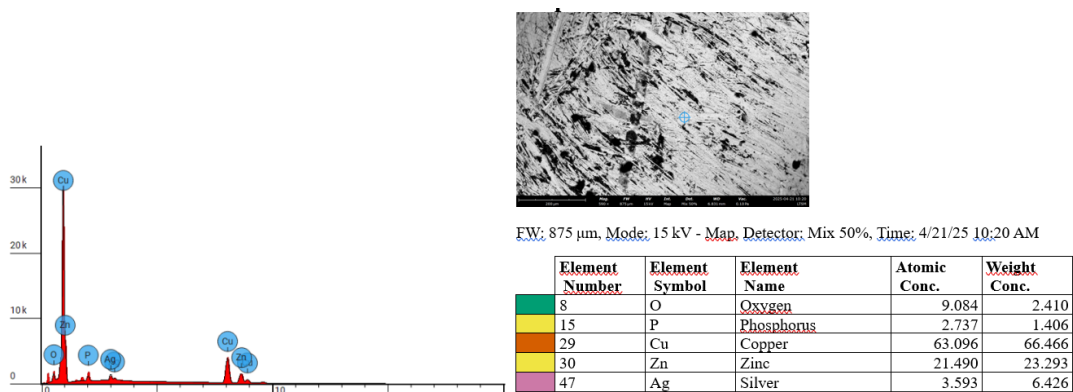


Figure 2.3: Composition chimique d'une baguette d'argent pour brasure.

2.2.2.2 Baguette ‘fausse brasure’

Cette baguette appelée ainsi dans le commerce nous a paru bizarre. La baguette est longue d’environ 80 cm et elle est de couleur ocre jaune. Elle ressemble à du laiton.

L’analyse de la composition de la baguette en laiton, montrée à la figure 2.4, nous confirme que l’alliage en question est du laiton monophasé.

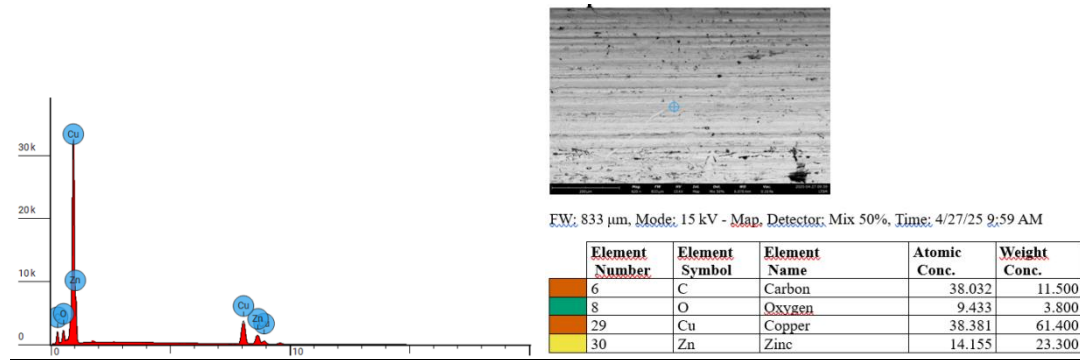


Figure 2.4: Composition chimique d’une baguette en laiton pour brasure.

2.2.2.3 Fil aluminium

Le fil d’aluminium est un fil de 1.6 mm de diamètre et constitué d’aluminium pratiquement pur. La figure 2.5 montre la composition chimique du fil d’Al utilisé.

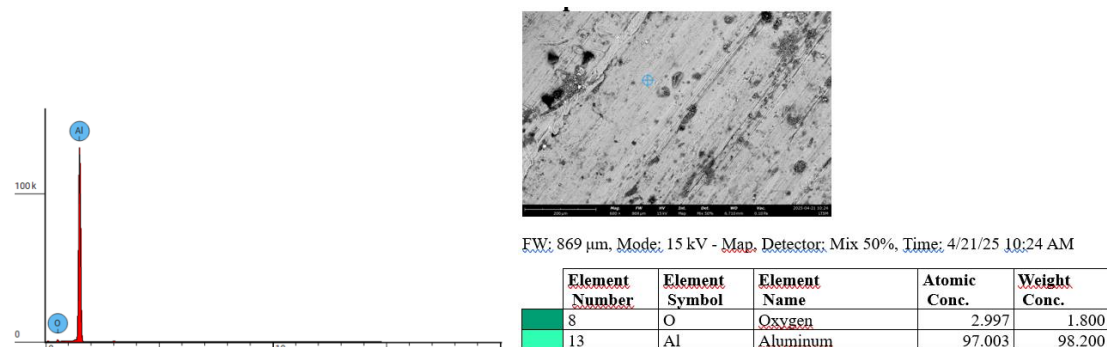


Figure 2.5: Composition chimique du fil d’aluminium pour la préparation de nouveaux métaux d’apport.

2.3 Chalumeau Express

Le chalumeau Express est un outil polyvalent et indispensable pour les travaux de brasage. Que ce soit pour réaliser des soudures, des brasages, des décapages ou des travaux de plomberie. Il vous permet d'obtenir une flamme puissante et réglable pour des résultats précis et rapides. La figure 2.6 montre une photo du chalumeau Express. [9]



Figure 2.6: Chalumeau Express.

2.3.1 Spécifications techniques

Plage de pression d'utilisation : 1 bar à 3 bars.

Pour une alimentation butane : 1.5 bars.

- Consommation : 312 g/h.
- Puissance : 4.3 kW/14690 BTU.

Appareil à pression directe : butane.

Débit nominal : 1000 g/h à 1,5 bar.

Puissance : 13 kW/h

2.4 Chauffage par induction

Les appareils de chauffage par induction haute fréquence de la série IHG (100 kHz à 1100 kHz) permettent de chauffer rapidement la plupart des métaux, comme l'aluminium et les poudres métalliques, que les autres fréquences ne permettent pas de chauffer caractéristique unique. Ces appareils sont idéaux pour le recuit de fils d'acier fins (comme ceux utilisés en dentisterie), la trempe de petits arbres de précision, le brasage de lames de scie en alliages durs et la fusion de poudres métalliques. La figure 2.7 montre une photo du système de chauffage par induction. [10]



Figure 2.7: Appareils de chauffage par induction

2.4.1 Caractéristiques principales

- Spécialement conçu pour le chauffage et le soudage de pièces métalliques minces, de lames et la fusion de petites quantités de matériaux métalliques, ultra rapide.
- Facilité d'utilisation : il suffit de brancher l'alimentation et de connecter le système de refroidissement par eau.
- Contrôle précis avec affichage numérique de la sortie, de la fréquence et du courant.
- Interrupteur à pied à distance pour un fonctionnement plus sûr.
- Modes automatiques et manuel doubles.
- La fréquence n'est pas réglable, elle dépend de la conception de la bobine (diamètre des tours, nombre de tours, diamètre du tube en cuivre et longueur totale).
- Fabricant enregistré ISO 9001:2008. [10]

2.4.2 Caractéristiques de sécurité

- Protection contre les surtensions : l'appareil s'arrête lorsque la tension d'entrée dépasse 245 V. Le voyant de surtension s'allume et un signal sonore retentit en continu. L'alarme et le voyant s'éteignent automatiquement lorsque la tension descend en dessous de 245 V.
- Protection contre la surchauffe : si le capteur détecte une température du dissipateur thermique IGBT supérieure à 55 °C, la machine s'arrête, le voyant de surchauffe

s'allume et un signal sonore retentit en continu. Augmentez la pression de l'eau ou baissez la température.

- Protections contre les surintensités/dysfonctionnements : la machine s'arrêtera, le voyant s'allumera et un buzzer retentira en continu si l'une de ces situations se produit :
- L'une des pièces de la machine surchauffe.
- Signal interférent détecté.
- Court-circuit entre les pièces et les bobines d'induction
- Pannes de machines.
- Bobines d'induction se touchant.
- La tension d'entrée est trop faible.
- Protection contre la basse pression d'eau : si la pression de l'eau descend en dessous de 29 PSI. [10]

2.4.3 Caractéristiques Générales

Table 2.1: Caractéristiques Générales de la machine d'induction.

Courant d'entrée max.	25A (disjoncteur triphasé 31A requis)
Pouvoir	460 VCA, 50/60 Hz, triphasé
Fréquence de sortie	50-250 kHz
Puissance d'entrée	20 kW
Cycle de service	100 %, 24 heures
Refroidissement par air	Ventilateur arrière
Pression de l'eau	$\geq 0,2$ Mpa (29 PSI) vous pouvez utiliser de l'eau du robinet et une pompe à eau ($> 1/4$ HP et > 240 Gph)
Débit d'eau	> 5 litres par minute
Interrupteur à pédale à	Longueur 2 mètres

distance	
----------	--

[10]

2.5 Four à moufle

La gamme des fours à calcination AAF Carbolite est conçue spécifiquement pour fournir des conditions optimales de calcination pour assurer une combustion complète de l'échantillon. Idéal pour les laboratoires où la calcination est entrecoupée par d'autres travaux de traitement thermique. La figure 2.3 montre une photo du four à moufle. [11]



Figure 2.8: Four à moufle Carbolite, modèle AAF 11/7.

2.5.1 Données du produit

Pour des températures ne dépassant pas les 1100 °C.

- Moufle en céramique avec chauffage par 2 côtés avec éléments chauffants couverts (AAF 11/18).
- Porte basculante vers le haut avec guidage parallèle.
- Opérateur protégé en permanence du côté chaud de la porte par une isolation thermique.
- Isolation en fibre moulée sous vide.
- Temps de chauffe env. 100 °C/min.

- Air préchauffé pour une meilleure répartition de la température.
- Taux de renouvellement d'air : env. 5 à 6 renouvellements d'air par minute.
- Ouverture de ventilation avec cheminée (\varnothing 38 mm).
- Contacteur de porte.
- Régulateur de température PID avec affichage numérique (affichage température de consigne/réelle).
- Saisie d'un profil d'équilibrage de la température avec 2 segments : cadence de chauffage et heure d'arrêt à l'aide de la fonction minuterie. [11]

2.5.2 Informations techniques

Table 2.2: Informations techniques du four a moufle.

<u>Type</u>	<u>AAF 11/7</u>
<u>Température max.</u>	<u>1100 °C</u>
<u>Largeur int.</u>	<u>170 mm</u>
<u>Hauteur int.</u>	<u>90 mm</u>
<u>Profondeur int.</u>	<u>455 mm</u>
<u>Puissance.</u>	<u>3900 W</u>

2.6 Microscopie optique

La microscopie est un ensemble de techniques permettant d'obtenir une image des structures. Elle permet de rendre visible les éléments invisibles à l'œil nu, soit par leur taille, soit par leurs couleurs. L'appareil utilisé pour rendre possible cette observation est appelé un microscope. Le pouvoir séparateur est la capacité de distinguer deux points adjacents comme distincts. L'œil a la capacité de distinguer des particules d'un diamètre pouvant atteindre 0,1 μm . Toutefois, elles doivent être séparées entre elles d'une distance

d'au moins 5 μm . Le pouvoir séparateur de l'œil est de 5 μm . La qualité d'un microscope ne dépend pas du grossissement, mais du pouvoir séparateur, c'est-à-dire de la capacité que possède cet instrument pour séparer 2 points voisins. Rien ne sert d'agrandir une image qui serait floue.



Figure 2.9: Microscope optique.

Le principe est dans tous les cas le même une onde est envoyée sur la préparation ou émise par la préparation. Cette onde est captée par un objectif qui la concentre et passe par un oculaire qui crée une image observable, Cette image est soit observée à l'œil nu, soit photographiée, soit enregistrée par caméra et stockée sur ordinateur pour traitement.

2.7 Chalumeau oxy-acétylène

Le chalumeau oxyacétylénique est un outil indispensable pour de nombreux professionnels du soudage et de la métallurgie. Cet appareil polyvalent permet de réaliser des opérations de soudage, de brasage, de découpe et de chauffage sur divers métaux. Choisir le bon chalumeau oxyacétylénique est primordial pour garantir des résultats optimaux et travailler en toute sécurité. [12]

2.7.1 le fonctionnement du chalumeau oxyacétylénique

Avant de se lancer dans le choix d'un chalumeau oxyacétylénique, il est nécessaire de bien comprendre son principe de fonctionnement. Cet outil utilise la combustion d'un mélange d'acétylène (C_2H_2) et d'oxygène (O_2) pour produire une flamme extrêmement chaude, pouvant atteindre des températures allant jusqu'à 3100°C. Cette chaleur intense permet de fondre et de souder les métaux, mais aussi de les découper avec précision.

Le chalumeau oxyacétylénique se compose de plusieurs éléments clés :

Deux bouteilles de gaz : une pour l'acétylène et une pour l'oxygène

Des détendeurs pour réguler la pression des gaz

Des tuyaux flexibles pour acheminer les gaz jusqu'au chalumeau

Un chalumeau avec des buses interchangeables

Une tige de soudage pour l'apport de métal lors du soudage

Le mélange des gaz se fait au niveau de la buse du chalumeau, créant ainsi la flamme nécessaire aux différentes opérations. La maîtrise du réglage de cette flamme est un aspect crucial pour obtenir des résultats de qualité. [12]

2.8 Préparation des échantillons

Les échantillons utilisés étaient soit des plaques ou des tubes d'acier au carbone, d'acier inoxydable, de cuivre et d'aluminium. Un mélange de ces types de matériaux est parfois fait pour braser des matériaux dissemblables. Une découpe par une cisaille guillotine et par tronçonneuse est d'abord faite pour obtenir des tailles manipulables pour nos besoins de brasure.

Cette préparation préalable consiste en :

- Un polissage mécanique (figure 2.6) en utilisant un papier abrasif.
- Un décapage chimique appliqué en surface des échantillons afin d'éliminer les oxydes et les impuretés.
- Un rinçage à l'eau et séchage immédiat sous pression d'air comprimé.



Figure 2.10: Polisseuse.

Chapitre 3

RÉSULTATS & DISCUSSIONS

3.1 Introduction

Nous présentons ici les résultats de notre travail sur les différents types de brasure que nous avons réalisé. Ils concernent aussi bien les brasures tendres que les brasures fortes et ceci avec différentes méthodes d'exécution. Parmi ces méthodes, il y a le brasage à la flamme qui est une méthode populaire en raison de la simplicité de son équipement, de sa polyvalence en termes de source de gaz et de son large éventail d'applications. Il faut dire que la plupart des applications du brasage industriel moderne sont encore satisfaites par le brasage à la flamme. La technologie de chauffage par induction appliquée au brasage remplace avantageusement les systèmes à flamme ouverte ou les fours. Le chauffage par induction transfère plus d'énergie par millimètre carré qu'une flamme ouverte. Plus simplement, l'induction permet de braser davantage de pièces que d'autres processus. Cependant, il ne fait aucun doute qu'aujourd'hui, la plupart des assemblages brasés sont réalisés dans des fours de brasage sous atmosphère protectrice. Le recours au brasage sous atmosphère réductrice est un procédé d'assemblage privilégié pour les assemblages en acier doux et en acier inoxydable, le cuivre et certains alliages à base de cuivre, et connaît une croissance croissante chaque année. Cela s'explique sans doute par la prise de conscience croissante de l'intérêt de ce procédé par les pressions économiques et l'impact des enjeux environnementaux.

Dans les sections suivantes, nous avons essayé ces différentes techniques de brasage et nous en dévoilons les principaux résultats qui y sont issus.

3.2 Préparation des échantillons

Les éprouvettes étaient de différentes formes : tubes et plaques choisies selon la composition chimique et leur disponibilité dans le marché.

Les éprouvettes ont été obtenues donc à partir des plaques et des tubes. Leur découpage, en des tailles appropriées pour nos expériences, a été réalisé soit par une cisaille guillotine, soit par tronçonneuse.

Afin de réaliser l'opération de brasage en elle-même, une préparation préalable de leur surface a été nécessaire. Elle consiste en :

- Un polissage mécanique en utilisant un papier abrasif
- Un décapage chimique appliqué en surface des échantillons afin d'éliminer les oxydes et les impuretés.
- Un rinçage à l'eau et séchage immédiat sous pression d'air pur.

3.3 Brasure avec des métaux d'apport commerciaux

3.3.1 Brasage à l'étain commercial

3.3.1.1 Brasage à la flamme

La brasure à l'étain est la soudure la plus accessible. L'étain, métal précieux en plomberie, offre une résistance à la corrosion et un point de fusion bas (232°C), idéal pour le brasage tendre. Autrefois associé au plomb dans les soudures traditionnelles, l'étain joue aujourd'hui un rôle crucial dans des applications spécifiques, soumises à des réglementations environnementales strictes. Une préparation minutieuse et un choix judicieux de matériel sont essentiels pour garantir la qualité et la durabilité des soudures à l'étain. La qualité de l'étain, la propreté des surfaces et les outils utilisés influencent directement la solidité et l'étanchéité des joints. Avant le brasage, un nettoyage et un dégraissage rigoureux des surfaces à assembler sont impératifs.

Toute trace de rouille, d'oxyde, de graisse, de peinture ou d'autres impuretés a été éliminée pour assurer une bonne adhérence de l'étain. Le brossage métallique est une première étape essentielle, suivi d'un dégraissage avec un solvant approprié (alcool mais dans notre cas, nous avons utilisé de l'acide nitrique). Une surface propre et brillante garantit une meilleure mouillabilité de l'étain et une soudure solide et durable. Lorsqu'il y a des restes de traces de surfaces oxydées, un léger ponçage à la toile émeri est effectué avant le brossage métallique. Ensuite, nous couvrons la zone désoxydée avec un décapant, que nous avons acheté localement, et badigeonnons l'intérieur des matériaux (tuyaux ou plaques) avant d'assembler les deux matériaux (Cu-acier, acier-acier ou acier – Al).

Une fois la préparation des matériaux à braser terminée, nous plaçons rapidement les deux matériaux à braser dans un étau pour les maintenir solidaire (les plaques notamment) et nous commençons le préchauffage des pièces jusqu'à la température de 200 °C environ.

La figure 3.1 montre une photo de cette opération de brasage. Une fois la température de fusion atteinte, nous mettons le métal d'apport entre les deux plaques jusqu'à l'écoulement du métal ou la formation de joint.

Une fois l'opération de brasage terminée, nous faisons un test préliminaire de désassemblage des pièces à la main. Nous constatons que la brasure à l'étain nous donne une très bonne adhésion et un très bon écoulement sur l'acier et le cuivre. Cependant, pour le couple cuivre-aluminium, la brasure s'est rapidement fissurée et les deux plaques se sont désolidarisées après le test d'arrachement à la main. Les photos de la figure 3.2 montrent le brasage des plaques cuivre – acier et acier –acier après l'opération de brasage.



Figure 3.1: Le préchauffage des plaques au chalumeau Express et brasage.

Les raisons pourquoi l'étain n'adhère pas sur l'aluminium (comme rapportée dans la littérature) :

- Formation d'une couche d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) : L'aluminium réagit rapidement avec l'oxygène de l'air pour former une couche d'oxyde très stable et adhérente à sa surface.
- Difficulté de nettoyage de la surface : Pour réussir le brasage, il faut enlever ou dissoudre la couche d'oxyde. Cela nécessite l'utilisation de flux spécifiques très efficaces, souvent à

base de fluorures, pour pénétrer et éliminer l'oxyde avant ou pendant le processus. Le flux est un produit chimique qui joue un rôle essentiel dans le processus de brasage. Il réduit la tension superficielle de l'étain, facilitant son écoulement et sa pénétration entre les surfaces à assembler. Il agit également comme un protecteur contre l'oxydation, empêchant la formation d'une couche d'oxyde qui pourrait empêcher l'adhérence de l'étain. Le choix du flux est important et dépend du type d'étain et des matériaux utilisés. Le flux local que nous avons utilisé n'a pas été efficace sur le brasage Cu-Al.



Figure 3.2: Brasage de plaques Cu-Acier et acier-acier a l'étain.

La figure 3.3 présente l'observation métallographique des échantillons brasés au microscope optique. Nous observons qu'il y'a un bon accrochage entre les métaux de base et le métal d'apport sans diffusion.

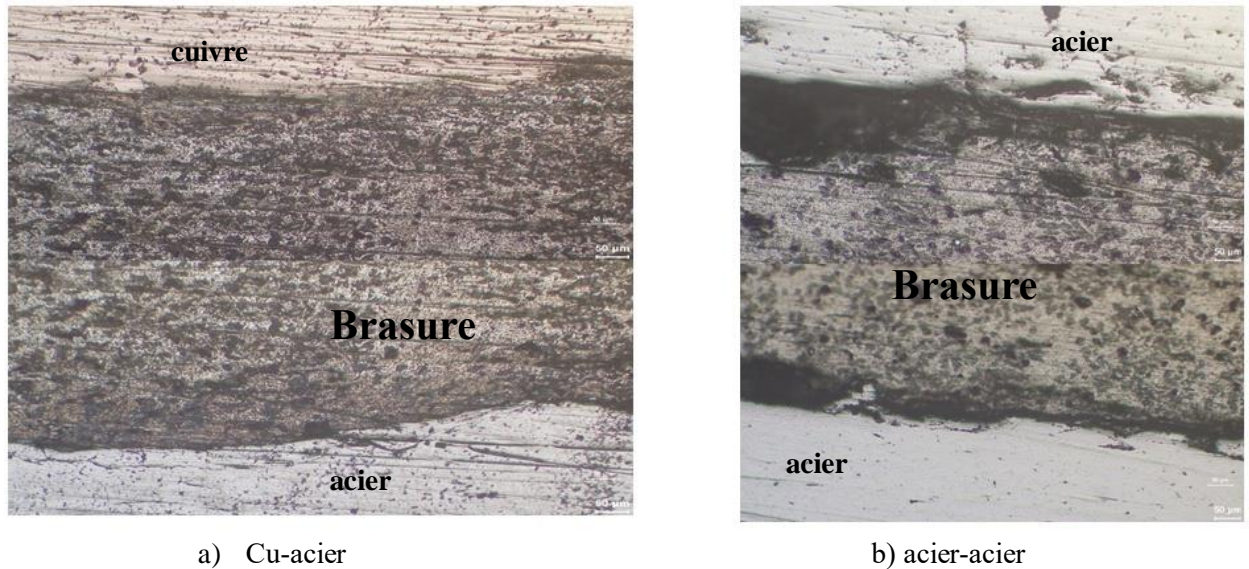


Figure 3.3: Coupe métallographique des brasures.

La répartition du joint semble uniforme. Sur le couple acier-acier, nous distinguons quelques boursoufflures dues à l'évaporation du flux contenu dans l'étain. Dans l'ensemble, la brasure était lisse et bien répartie. Ces plaques étaient destinées aux essais de traction mais un empêchement de dernière minute (problème de logiciel) a rendu cette opération impossible.

3.3.1.2 Brasage au four

Le brasage au four permet d'assembler des pièces métalliques en les chauffant et en utilisant un métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à celui des pièces jointes. Le matériau de remplissage circule entre les surfaces de l'articulation étroitement ajustée en raison de l'action capillaire. L'interaction entre le métal fondu et les matériaux de base forme un lien métallurgique alors que le matériau de remplissage se refroidit et se solidifie.

Dans notre cas, l'articulation étroite entre les plaques à braser était ajustée à l'aide d'un fil métallique en acier au carbone. L'étain était alors placé à la jonction entre les deux

matériaux à braser. La figure 3.4 illustre cette préparation avant le chauffage du four. Nous remarquons que les plaques sont placées comme suit :

- plaque aluminium et par-dessus plaque d'acier
- plaque d'acier et par-dessus plaque d'aluminium.

Cette précaution est prise pour s'assurer que l'écoulement de l'étain ne dépend pas de la position des plaques. C'est les paramètres de contrôle du four qui régissent la brasure.

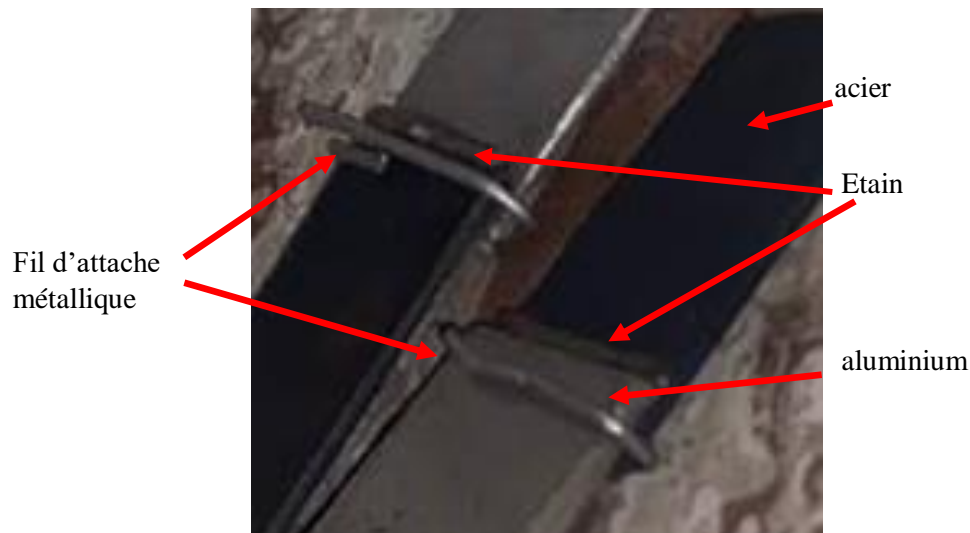


Figure 3.4: Préparation des échantillons à braser dans le four.

D'autre part, la brasure au four a concerné l'aluminium avec l'acier ou le cuivre car la brasure à flamme avait échoué. Les plaques installées dans le four étaient inclinées d'environ 45 ° afin d'éliminer le problème de la gravité. Une baguette d'étain était posée sur les plaques dissymétriques en jonction.

Nous avons réglé la température du four à moufle à 250°C (température de fusion de l'étain est 232 °C) pour des temps de maintien de 10,20 et 30 minutes après que la température de four atteinte 250°C. Les échantillons ne sont placés dans le four qu'une fois la température désirée était atteinte. Après le temps de maintien, les échantillons sont sortis du four et refroidis à l'air libre.

Pour tous les temps de maintien que nous avons essayé, l'essai d'arrachement des plaques brasées a été effectué pour tous les temps de maintien. Le désassemblage des plaques était rapide après un petit test de traction à main nue. Il est évident que le brasage de l'aluminium avait besoin d'un flux spécifique pour sa réussite. Nous avons tenté d'acheter un flux spécifique à l'aluminium mais à notre surprise nous n'avons pas trouvé aucun produit sur le marché local. Par conséquent, des flux de brasage spéciaux pour l'aluminium et les alliages d'aluminium doivent être utilisés pour garantir un brasage correct. Pour information, on utilise en général la Cryolite (fluorure de sodium et d'aluminium) qui est particulièrement utile pour le brasage de l'aluminium car elle élimine efficacement les oxydes d'aluminium, garantissant une surface propre pour le collage. Il y a aussi une poudre hygroscopique (une substance hygroscopique est une substance qui a tendance à retenir l'humidité de l'air, par absorption ou par adsorption.), contenant des sels de chlorures et de fluorures inorganiques complexes. Cependant, il est à noter que l'activation de ces flux se fait à des températures différentes

3.3.1.3 Chauffage par induction

Les entreprises manufacturières cherchent aujourd'hui à augmenter leur efficacité de production, réduire les coûts de fabrication et remplacer les fours peu performants et coûteux en énergie et en espace, tout en améliorant la qualité de leurs produits. Le brasage par induction permet de s'affranchir des problèmes posés par le brasage au chalumeau et au four en éliminant la nécessité de recourir à un opérateur qualifié, en réduisant les coûts énergétiques et en diminuant l'encombrement des équipements tout en mettant en œuvre un processus de fabrication allégé pour des pièces de plus grande qualité.

Dans cette section, nous avons donc essayé le brasage par le chauffage par induction. Cependant les bobines d'induction mis à notre disposition ne répondaient pas à nos besoins de brasage. Ils étaient plus destinés à la fusion des métaux. C'est pourquoi nous avons entrepris de fabriquer notre propre bobine d'induction ou inducteur.

La première étape dans cette partie du travail, était de choisir la bobine d'induction ou inducteur qui correspond avec la forme des plaques que nous allons braser. Nous disposions d'un tube de cuivre utilisé dans l'industrie du froid qui avait un diamètre de 8 mm. Ce tube

devait être façonné pour en faire un inducteur selon les deux plaques qui seront brasées. Pour ce faire, nous avons introduit dans le tube en cuivre, de la grenaille en bille de verre dans un morceau de tube d'environ 60 cm de long. Ensuite, nous avons chauffé le tube en son milieu et sur les pourtours du milieu du tube de cuivre et nous avons plié le tube de cuivre autour d'un tube d'acier de diamètre de 25 mm. Le choix du tube d'acier était dicté par l'épaisseur des deux plaques à braser plus un espace d'environ 8 mm laissé de chaque côté des plaques. Le résultat est montré à la figure 3.5.



Figure 3.5: Façonnage de l'inducteur de cuivre pour l'opération d'induction.

Afin de garantir une bonne tenue de l'inducteur vis-à-vis du chauffage par induction, nous avons appliqué une peinture spéciale à haute résistance à la température (jusqu'à 600 °C). Les échantillons sont ensuite placés dans un support en brique dans laquelle une fente est pratiquée pour fixer les deux plaques à braser comme l'illustre la figure 3.6. Un morceau d'étain est placé entre la fente laissée entre les deux plaques.



Figure 3.6: Préparation des échantillons à braser par chauffage à induction.

Les étapes que nous avons réalisées pour obtenir une brasure par induction de qualité :

1 Nous avons créé un joint de forme correcte en prévoyant un jeu d'environ 500 μm entre les deux surfaces à la température d'écoulement du matériau d'apport pour permettre la capillarité et le mouillage du joint. En pratique, ce jeu laissé entre les deux plaques doit être entre 40 et 125 μm . Il nous a été difficile de faire mieux avec les moyens dont nous disposions.

2 Nous procédons au nettoyage des surfaces des matériaux du joint à l'aide d'un brossage métallique et d'un papier émeri de 220 μm .

3 Nous appliquons le flux sur les deux pièces. Le flux était un flux commercial en forme de poudre contenant du borax.

4 Nous fixons les deux parties ensemble à l'aide d'une plaque en céramique et positionner l'ensemble entre les tuyaux de l'inducteur.

5 Nous chauffons les deux pièces jusqu'à ce qu'elles atteignent la température d'écoulement du matériau d'apport.

6 Nous nettoyons le joint brasé à l'aide de l'eau et d'une brosse métallique pour retirer tous les résidus de flux.

Le chauffage par induction est un chauffage sans contact qui utilise un certain degré de fréquence de chauffage pour chauffer des matériaux conducteurs d'électricité. Pour chaque application, le chauffage par induction fonctionne à des fréquences différentes. Plusieurs

aspects influencent le choix de la fréquence du chauffage par induction. Nous pouvons citer quelques-uns des paramètres opératoires du chauffage par induction : durée du chauffage et taux de production, le type de métal utilisé, diamètre de la pièce, le contrôle de la profondeur

Avec l'équipement dont nous disposions, nous pouvions contrôler le temps de chauffage, l'intensité du champ électromagnétique exprimée en Tesla et la puissance de chauffage. Dans les sections qui suivent, nous présentons les résultats du brasage à l'étain de deux plaques d'aciers faisant modifier l'intensité du champ électromagnétique et la puissance de chauffe. Le temps de chauffage est déterminé expérimentalement pour toutes les expériences. Il est le temps nécessaire pour fusionner complètement le fil d'étain entre les deux plaques à braser.

Dans une première expérience, l'utilisation d'une grande puissance a tout de suite montré qu'elle n'était pas appropriée pour ce type de brasage. Les échantillons chauffés très vite et risqués de fusionner en même temps que le métal d'apport. C'est pourquoi, pour le reste des expériences, seule l'intensité du champ électromagnétique était variée et le temps de fusion du métal d'apport en était déduit. Les résultats de ces expériences sont présentés ci-après. Le tableau 3.1 résume les paramètres opératoires du brasage par induction que nous avons employé.

Table 3.1: : Paramètres opératoires du brasage par chauffage par induction.

Paramètres opératoires	Valeurs		
L'intensité du champ magnétique	17 Tesla	15 Tesla	12 Tesla
Puissance de chauffe	3.1 KW	3.1 KW	3.1 KW s

Les figures 3.7, 3.8 et 3.9 montrent respectivement les résultats du brasage pour les différentes intensités du champ électromagnétique imposées à l'inducteur.

Visuellement, nous constatons que l'écoulement de l'étain dans les fentes pratiquées dans les plaques est meilleur pour l'intensité du champ électromagnétique de 17 Tesla. Le temps de fusion de la brasure a été aussi le plus court pour cette puissance. Le tableau 3.2 donne les résultats des temps de maintien de la puissance de chauffe en fonction de la puissance électromagnétique appliquée. Nous rappelons que la puissance était maintenue constante à 3.1 kW pour toutes les expériences.

Table 3.2: Influence de la puissance électromagnétique sur le temps de brasage.

Paramètres opératoires du brasage	Valeurs		
L'intensité du champ magnétique	12T	15T	17T
Le temps de fusion	35s	18s	11



Figure 3.7: Brasage des plaques d'acier par induction à 17 T et P= 3.1 KW.



Figure 3.8: Brasage des plaques d'acier par induction à 15 T et $P= 3.1$ KW.



Figure 3.9: Brasage des plaques d'acier par induction à 12 T et $P= 3.1$ KW.

De ces expériences, nous tirons les conclusions suivantes :

- une grande puissance de chauffe (20.2 kW) implique un chauffage trop important des pièces à braser et une fusion excessive de la brasure ;
- une puissance de chauffe faible (3.1 kW) implique un faible chauffage des pièces à braser, une meilleure fusion du métal d'apport avec l'augmentation de l'intensité du champ électromagnétique et une réduction du temps de chauffe.

Du point de vue pratique, il y a intérêt à employer une faible puissance de chauffe avec une grande intensité du champ électromagnétique. Cela sera plus économique puisque la cadence de travail sera plus grande au vu des temps de brasures courts.

Les figures 3.10 et 3.11 représentent les coupes transversales des plaques brasées aux puissances électromagnétiques de 12 Tesla et 17 Tesla respectivement. Nous remarquons qu'il y a une bonne distribution de la brasure entre les plaques remarque et qu'il y'a un bon accrochage de l'étain sur l'acier. L'arrachement des deux plaques à la main était impossible.

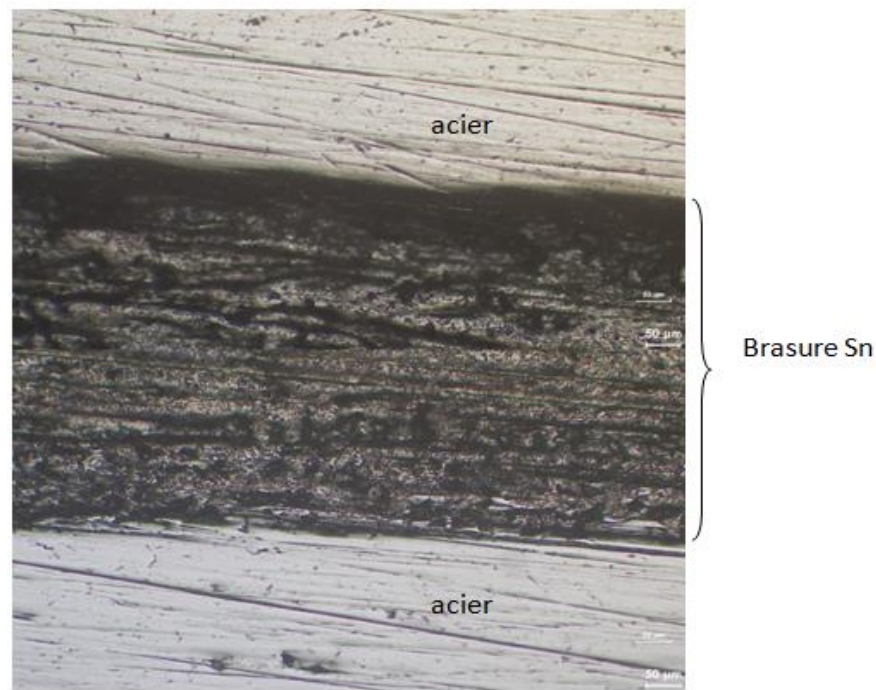


Figure 3.10: Coupe transversale des plaques d'acier brasées à 12 Tesla et $P = 3.1$ kW.

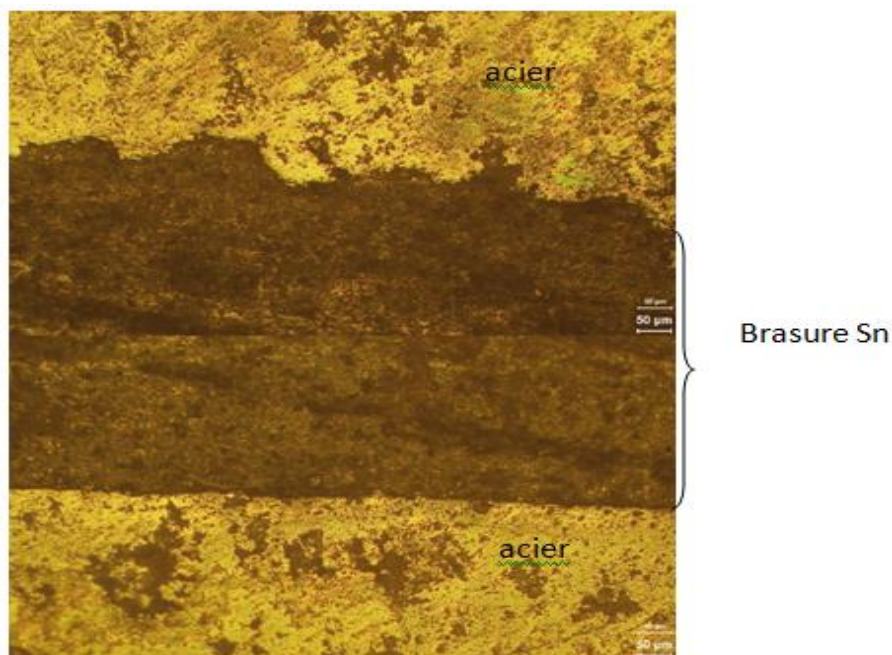


Figure 3.11: Coupe transversale des plaques brasées acier-acier à 17 Tesla et $P = 3.1$ kW.

3.3.2 Brasage à la baguette d'argent

3.3.2.1 Analyse de la baguette d'argent commerciale

L'analyse à la diffraction aux R-X (EDS) a révélé avec surprise que la baguette d'argent commerciale est en fait une baguette de cuivre alliée à l'argent et le zinc. C'est donc un laiton monphasé avec environ 6.5 % d'Ag. Le tableau 3.3 donne la composition chimique de la baguette d'argent commerciale.

Table 3.3: Composition chimique d'une baguette d'argent commerciale.

Elément (symbole)	Elément (nom)	% Wt.
P	Phosphore	1.406
Cu	Cuivre	66.466
Zn	Zinc	23.293
Ag	Argent	6.426

3.3.2.2 Chalumeau Express

Les premières expériences d'une brasure sur deux plaques d'acier réalisées avec le chalumeau Express n'étaient pas concluantes. La baguette d'argent prenait beaucoup de temps à chauffer, les plaques à braser étaient surchauffées au rouge. Nous avons délaissé cette méthode au profit d'un chauffage par induction.

3.3.2.3 Chauffage par induction

Pour ces expériences nous avons choisi deux tubes d'acier-cuivre à braser. La bobine d'induction ou inducteur est choisi pour épouser les contours des tubes. Il est de forme circulaire et un espace d'environ 10 mm de part et d'autre des tubes d'acier-cuivre. La figure 3.12 montre du montage des tubes d'acier-cuivre fixés sur un étau et l'inducteur.



Figure 3.12: Montage destiné au brasage de tuyaux d'acier-cuivre avec la baguette d'Ag.

Donc on a préparé deux tubes en acier et en cuivre, ils ont été fixés sur un étau qui élimine leur mouvement au cours de l'opération de chauffage par induction. Des nos expériences précédentes avec la brasure par chauffage par induction, nous avons fixé les paramètres opératoires suivants : puissance à 3.1 KW et l'intensité de champ magnétique à 17T. Le

temps de fusion de la brasure d'argent a été ensuite déduit. Il est aussi à noter qu'un jeu d'environ 300 μm a été laissé entre les deux tubes.

La figure 3.13 montre une photo montre les tubes acier – cuivre après l'opération de brasage. Durant l'opération de brasage, nous avons observé un très bon écoulement du métal d'apport en les deux tubes acier-cuivre. Le désassemblage à la main des deux était impossible. L'aspect lisse et uniforme de la brasure indiquait que l'opération de brasage était un succès. La figure 3.14 correspond à l'observation microscopique après le découpage et la préparation de surfaces des pièces.



Figure 3.13: Brasage des tubes acier-cuivre par chauffage par induction.

La figure 3.14 montre une coupe transversale des tubes acier-cuivre brasés au chauffage par induction.

Nous constatons ici que le métal d'apport adhère bien avec le cuivre mais moins bien avec l'acier à cause du manque de matière du métal d'apport ou d'une mauvaise préparation de surface.



Figure 3.14: Coupe transversale des tubes acier-cuivre après brasage par induction.

3.3.3 Baguette ‘fausse brasure’

La baguette ‘fausse brasure’ est appelée ainsi pour des raisons qui nous sont inconnues. A noter que cette appellation est aussi utilisée à l’étranger. L’analyse de la composition chimique de cette baguette brasure est montrée au tableau 3.4.

Table 3.4: Analyse chimique de la baguette ‘fausse brasure’.

Elément (symbole)	Elément (nom)	% Wt.
C	Carbone	11.5
Cu	Cuivre	66.466
Zn	Zinc	23.293

D’après la composition chimique donnée au tableau 3.4, la baguette ‘fausse brasure’ est en fait du laiton monophasé.

Nous avons décidé de pratiquer la brasure de la baguette ‘fausse brasure’ à la torche oxyacétylénique sur deux tôles en acier au carbone. Les plaques sont d’abord nettoyées au papier émeri. Une tronçonneuse nous permet d’effectuer un jeu entre les deux plaques pour assurer l’écoulement entre elles. Du flux est ajouté entre les deux plaques et un

préchauffage au préalable est effectué sur celles-ci, ensuite la baguette est introduite délicatement dans la flamme pour la fusionner. Le métal d'apport fusionne et imprègne les bords des plaques. La brasure se forme. La figure 3.15 montre cette brasure en cours d'opération.

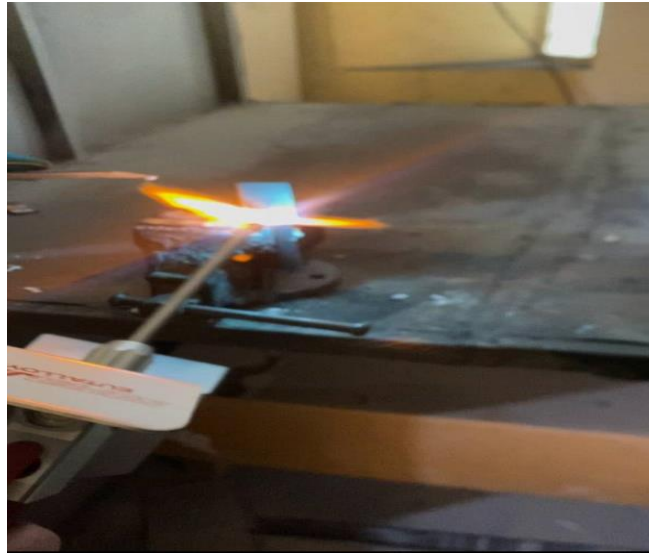


Figure 3.15: Brasure des plaques d'acier à la flamme oxyacétylénique.

L'arrachement à la main des pièces brasées s'est avéré non concluant. La figure 3.16 montre la brasure faite sur les deux plaques brasées au chalumeau oxyacétylénique alors que la figure 3.17 montre une coupe transversale de la brasure en question.

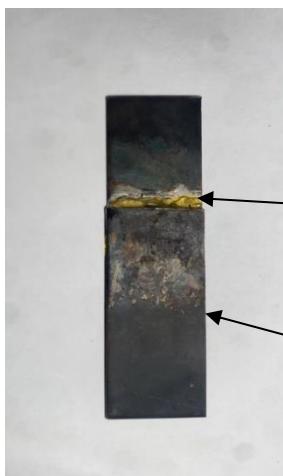


Figure 3.16: Brasage oxyacétylénique avec une baguette 'fausse brasure'.

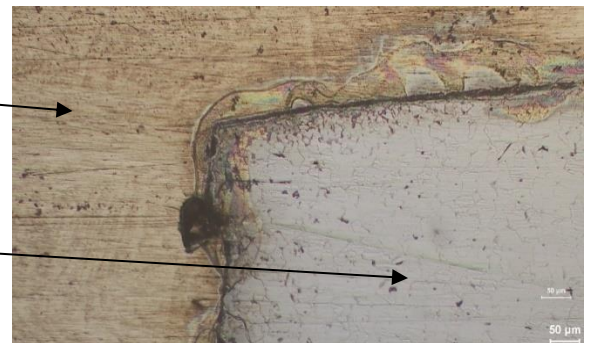


Figure 3.17: Coupe transversale d'une brasure avec la baguette 'fausse brasure'.

Il est à noter aussi que dans ces expériences, nous avons essayé de réaliser une brasure avec du fil d'aluminium pur sur deux plaques en aluminium de la série 1000.

L'expérience s'est avérée un échec car l'oxydation de l'aluminium empêchait toute réalisation d'une brasure viable.

3.4 Brasure avec des métaux d'apport fabriqués au LTSM

Dans cette partie du travail et en l'absence de métaux d'apport viables destinés pour la brasure des pièces métalliques dans le marché local, nous avons décidé de fabriquer nous-mêmes ces métaux d'apport. Nous avons choisi deux approches. La première consiste à fabriquer des poudres alliées par mécanosynthèse et de les utiliser comme matériau d'apport. La seconde méthode à préparer dans un four à fusion l'alliage du métal d'apport et de l'utiliser par la suite pour réaliser la brasure.

3.4.1 Brovage mécanique

Le métal d'apport Al-Si est généralement utilisé pour le brasage de l'aluminium et de ses alliages. La teneur en Si est comprise entre 7-13 % en poids. Dans notre cas, en l'absence du Si, nous avons préparé l'alliage AlCu, idéalement à un alliage à AlCu17% wt. Pour obtenir d'excellents joints brasés, la température de brasage doit être supérieure à 595 °C, ce qui est proche de la température de phase solide de l'alliage d'aluminium (environ 615 °C), ce qui peut entraîner une croissance des grains du métal de base ou une surchauffe. De plus, une température de brasage excessive augmente non seulement le coût de fabrication, mais provoque également la dissolution du métal de base, et la qualité du joint brasé obtenu est médiocre. La figure 3.18 montre le diagramme de phase Al-Cu. L'eutectique de cet alliage se situe à 548 °C pour une composition approximative de Al66% -Cu17%.

Pour nos besoins de préparation d'un tel alliage, nous avons à notre disposition une poudre à base de cuivre (voir figure 3.19) dont la composition chimique est donnée au tableau 3.5.

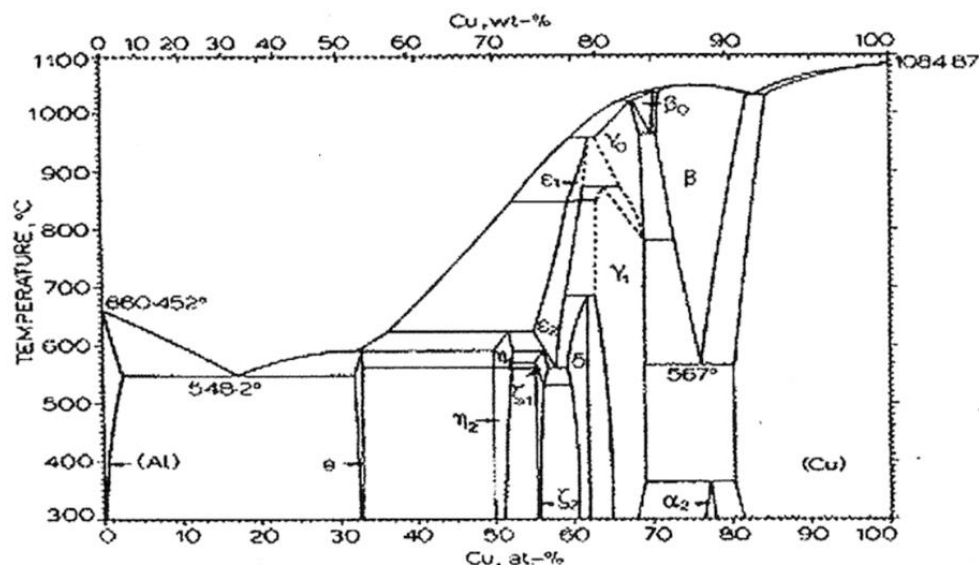


Figure 3.18: Diagramme de phase AlCu.

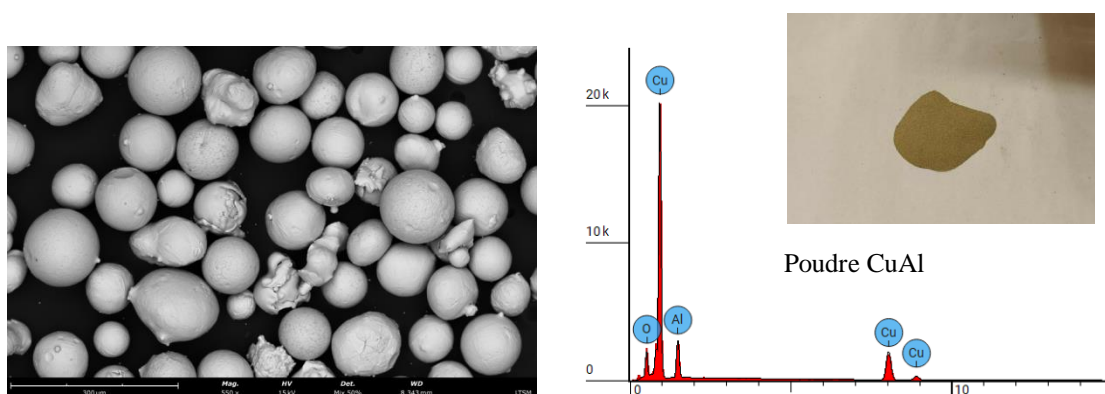


Figure 3.19: Particules de la poudre alliée CuAl

Table 3.5 : Composition chimique de la poudre alliée CuAl.

Elément (symbole)	Elément (nom)	% Wt.
O	Oxygène	5.9
Cu	Cuivre	79.40
Al	Aluminium	14.70

A cette poudre alliée de AlCu, nous avons ajouté de l'aluminium pur à 99.5 %wt de Castolin Eutectique (voir figure 3.20). Les calculs étaient faits pour que le mélange des deux poudres nous donne la composition chimique désirée. Ensuite, nous avons préparé

un lot de 100 grammes pour obtenir une poudre alliée de Al66%-Cu17% par broyage mécanique.

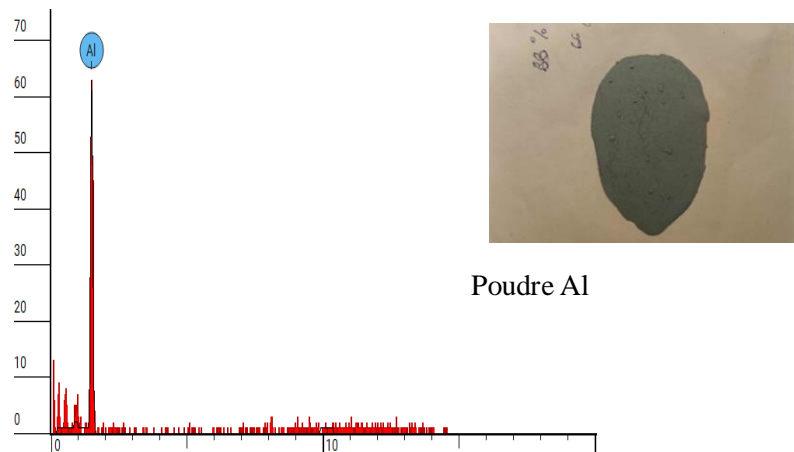


Figure 3.20: EDS de la poudre d'aluminium pur.

Les paramètres de broyage appliqués étaient la durée du cycle, le temps de pause et le temps de broyage. Le tableau 3.6 résume ces paramètres opératoires du broyage mécanique que nous avons essayé.

Table 3.6: Paramètres de broyage mécanique de la poudre Al66%Cu17%.

Essai	Temps total de broyage	Temps de broyage	Intervalle de pause
1	1 heure	15 min.	5 min.
2	1h30 minutes	10 min.	5 min.
3	30 minutes	10 min.	5 min.

Les résultats macroscopiques de l'aspect des poudres après broyage pour les essais n° 1 et n° 2 sont montrés sur les photos de la figure 3.21.



Figure 3.21: Aspect macroscopique des poudres AlCu après broyage de 1h et 1h30min.

Les tailles des poudres obtenues après broyage sont trop importantes. Il est évident que les temps de broyage choisis sont tels qu'il y a eu un soudage entre les particules d'aluminium et de cuivre qui fait augmenter les tailles de particules. Pour y remédier à ce problème, nous avons diminué le temps de broyage à 30 minutes. La poudre obtenue après ce troisième essai était beaucoup plus fine. L'analyse aux Rayons-X par l'EDS du MEB est donnée à la figure 3.22. L'analyse de la composition chimique des particules blanchâtres et grises est donnée à la figure 3.23.

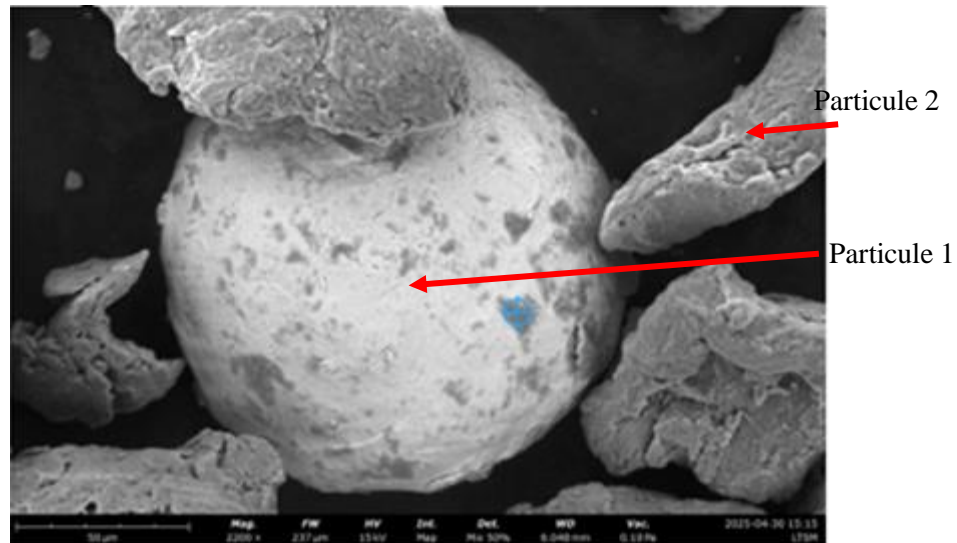


Figure 3.22: Particule AlCu obtenues par broyage mécanique durant 30 minutes.

Particules 1					Particules 2				
Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.	Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	11.980	4.100	8	O	Oxygen	12.728	7.500
13	Al	Aluminum	30.335	17.500	13	Al	Aluminum	82.956	82.400
29	Cu	Copper	57.685	78.400	29	Cu	Copper	4.316	10.100

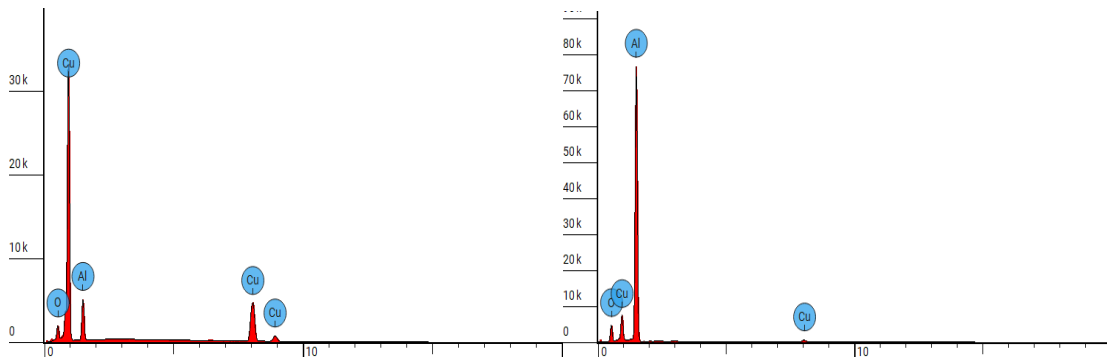


Figure 3.23: Analyse chimique des poudres broyées durant 30 minutes.

Nous remarquons que les particules blanchâtres ont une composition chimique d'environ 78.4%Cu et 17.5 %Al alors que pour les particules grises, la composition chimique est plutôt dominée par l'aluminium avec 82.4 %Al et 10.1 %Cu. Ces mélanges de composition de particules ne nous arrangent pas car dans le lot que nous avons fabriqué, les particules 1 sont plus importantes que les particules 2. Il est évident que le broyage mécanique n'est pas optimal. Une étude plus poussée du broyage mécanique doit être menée pour optimiser les tailles des poudres ainsi que l'uniformité de leur composition. Par manque de poudre d'aluminium, nous n'avons pas continué cette optimisation. Nous contentons des poudres obtenues par ce troisième essai de broyage mécanique pour réaliser nos essais de brasage. Dans un premier temps, nous avons mélangé les particules de poudre avec le flux commercial dont nous disposions. Ensuite, ce mélange était déposé délicatement sur deux plaques (une en Al et l'autre en Cu). Les plaques étaient préalablement nettoyées au papier émeri et à meulées pour façonner le jeu entre elles. Les plaques étaient ensuite placées dans un étau et serrées. Un chalumeau oxyacétylénique est employé pour l'opération de brasage. Le résultat est montré à la figure 3.24. Nous avons beaucoup de difficultés à fusionner la poudre de manière uniforme. La brasure est médiocre et une simple séparation des plaques à la main est faite très facilement.



Figure 3.24: Brasage de deux plaques avec un métal d'apport en poudre AlCu broyée.

Un mauvais contrôle de la composition de la poudre broyée (il y a plus de particules 78.4% Cu – 17.5 %Al que de particules à 82.4 %Al et 10.1 %Cu), un flux commercial de piètre qualité a rendu le brasage très difficile sinon impossible.

C'est pourquoi, afin d'exploiter cette poudre broyée avec une autre méthode de brasage, notamment au four, nous avons compacté la poudre broyée à l'aide d'un appareil de compactage afin d'obtenir des pastilles qui seront ensuite entre deux plaques aluminium-cuivre et cuites dans un four. Le résultat du compactage des poudres broyées est montré à la figure 3.25. La pastille obtenue avait des dimensions de 25 mm de diamètre et 2 mm d'épaisseur. Ces pastilles étaient très fragiles et il fallait donc les manipuler avec beaucoup de précautions.

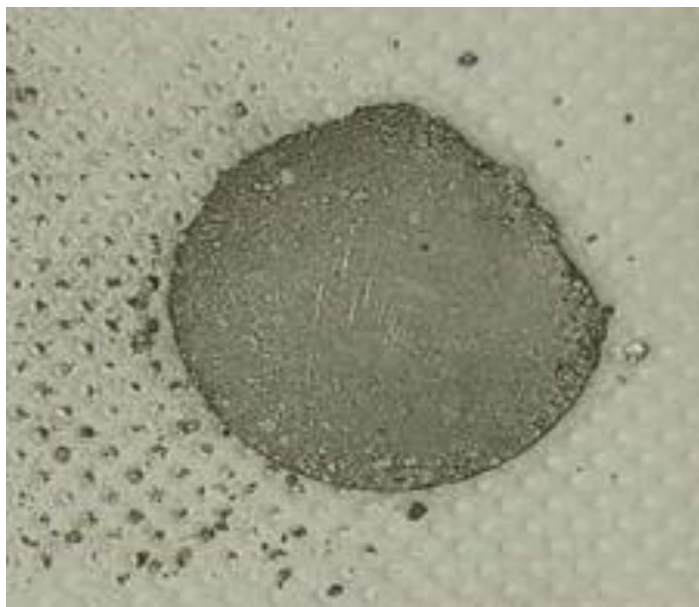


Figure 3.25: Pastille AlCu obtenue après l'opération de compactage.

Pour réaliser l'opération de brasage, nous avons confectionné deux plaques métalliques de 8 mm d'épaisseur dans lesquelles nous avons percés deux trous qui recevront deux boulons qui serviront de presse pour les plaques acier-cuivre et la pastille d'AlCu broyée et compactée. La figure 3.26 montre le montage des plaques d'acier pour la presse, des plaques acier-cuivre et deux pastilles AlCu. L'ensemble est bien serré et introduit dans un four à moufle à la température 800°C durant 30 minutes. En principe devrait fusionner à environ 750 °C. Ces paramètres ont été déterminés expérimentales par des essais préliminaires.

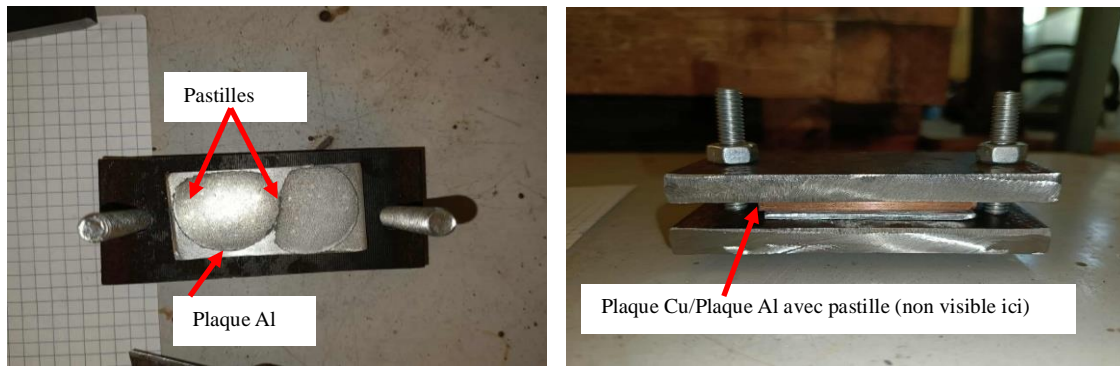


Figure 3.26: Montage pour réaliser la brasure au four.

Notons qu'au préalable, les plaques ont reçu un polissage mécanique aux papiers émeri de 220, 400 et 600 μm . Un décapage chimique est appliqué aux surfaces des plaques à braser avec une solution de 50 % HNO_3 pour l'aluminium et 40 % H_2SO_4 pour le cuivre. Un rinçage à l'eau s'en est suivi puis séché sous pression d'air.

Après la sortie du four, nous avons constaté que la fusion des pastilles n'était complètement entamée et que les plaques acier-cuivre se détachaient facilement. Plusieurs raisons ont contribué à ce résultat. La disparité des compositions chimiques des particules n'a pas aidé à la fusion complète des pastilles. Les particules à proportion élevée en Cu ont certainement empêché la fusion de se faire. D'autres, l'oxydation de l'aluminium dans les particules à haut pourcentage d'Al rendait difficile la fusion complète de celles-ci. Enfin, nous croyons qu'à défaut de faire la brasure dans une atmosphère sous vide, une atmosphère protectrice aurait aidé à mieux à réaliser la brasure.

3.5 Fabrication de métaux d'apport au four de fusion

Les expériences de broyage mécanique n'étaient pas concluantes, nous avons décidé d'élaborer nos propres métaux d'apport par fusion dans un four dédié à cela.

En règle générale, le choix du métal d'apport dépend de l'application. Par exemple, l'assemblage d'un tube à paroi mince nécessite une chaleur réduite, ce qui nécessite un métal d'apport fondant à basse température. D'autres facteurs à prendre en compte incluent le métal de base, l'état de service de l'assemblage terminé et le jeu entre les pièces. Pour un jeu serré (500 μm), un métal d'apport à plage de fusion étroite (faible intervalle de

solidification) convient parfaitement. À l'inverse, les métaux d'apport à plage de fusion large (fort intervalle de solidification) conviennent mieux pour un jeu important (plus de 600 μm). Dans cette étude, nous avons un métal d'apport à base de Zinc. Le métal d'apport à base de zinc est généralement associé à l'aluminium et/ou à l'étain. Tous ces métaux non ferreux conviennent bien pour la production d'un alliage à base point de fusion préparé dans le four de fusion du laboratoire LTSM.

Malheureusement, cette étude a été sérieusement freinée car le MEB s'est momentanément arrêté à cause du vide primaire. C'est pourquoi, la suite de la présentation des résultats sera essentiellement basée sur le côté pratique de la réalisation de la brasure et non pas sur la qualité du métal d'apport élaboré. Le tableau 3.7 donne les proportions des alliages coulés dans le four de fusion. La figure 3.27 donne les coulées respectives de la fusion 1, fusion 2 et fusion 3.

Table 3.7: Proportion des éléments composants les coulées.

Type	Elément 1	Elément 2	Elément 3
Fusion 1	Zn 100%wt	-	-
Fusion 2	Zn 90 %wt	Al 10%wt	-
Fusion 3	Zn 85 %wt	Al 15%wt	-

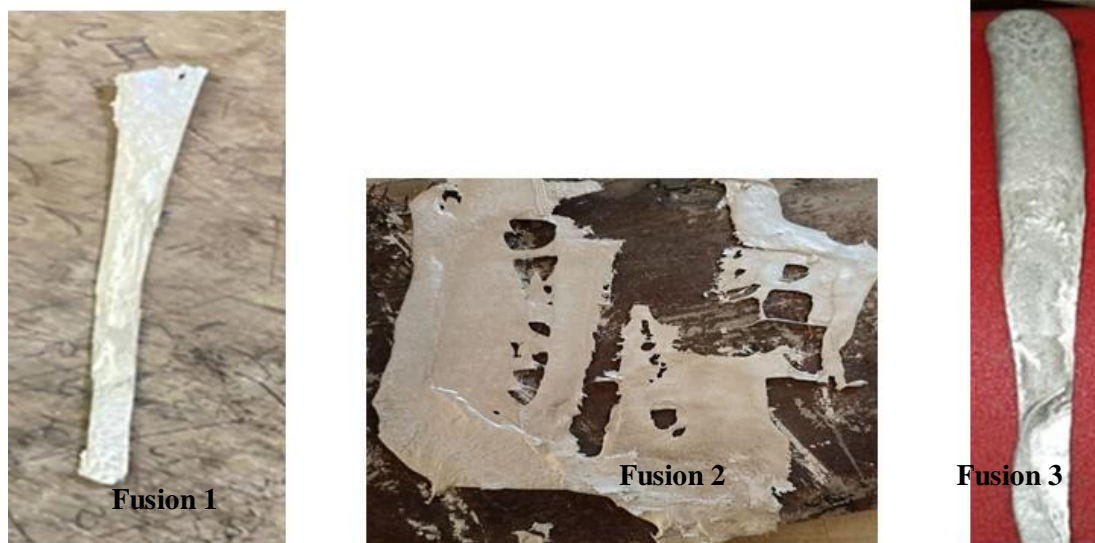


Figure 3.27: Coulée des différentes compositions des alliages ZnAl.

La figure 3.28 montre une coupe métallographique de la fusion 2. Nous remarquons la présence d'une solidification dendritique avec des zones riches en Zn et des zones riches en Al présentes dans les limites de joints de grain.

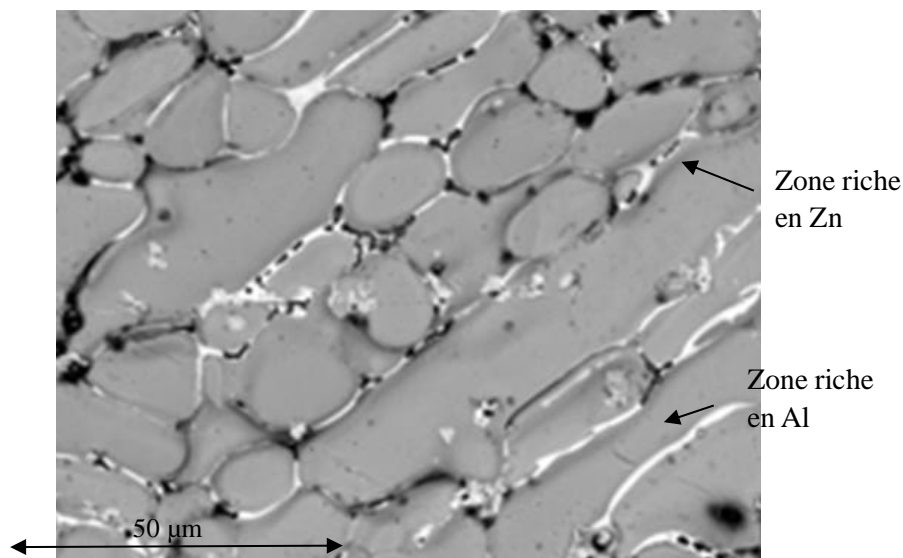


Figure 3.28: Analyse de la composition chimique de la fusion 2.

Les essais de brasure des baguettes issues des fusions 1 et 2 réalisés avec la torche oxyacétylénique n'ont pas donné de bons résultats. Il est probable que la présence d'intermétalliques dans ce genre d'alliages rend les brasures cassantes. Ces métaux d'apport issus des fusions 1 et 2 ont été abandonnés. Pour la brasure de la fusion 3, la

brasure était meilleure. C'est pourquoi que nous avons mené d'autres brasures mais cette fois-ci dans le four.

Les essais préliminaires du brasage des plaques acier-acier et acier-cuivre nous indiquent que la température du four qu'il faut maintenir pour réaliser de bonnes brasures, doit être maintenue entre 700 °C et 800 °C. Comme cela a été expliqué précédemment, nous utilisons les plaques presses pour réaliser le montage pour réaliser notre brasure. Des lames minces sont prélevées des feuilles minces coulées de la fusion 3. Ces lames sont ensuite insérées entre les plaques acier-acier ou acier-cuivre et le tout est introduit dans le four réglé à la température de 800 °C. Le temps de maintien était fixé à 30 minutes. A la fin du traitement, le montage est sorti du four et laissé refroidir à l'air ambiant. La figure 3.39 montre le montage des plaques avec le métal d'apport avant son entrée dans le four.

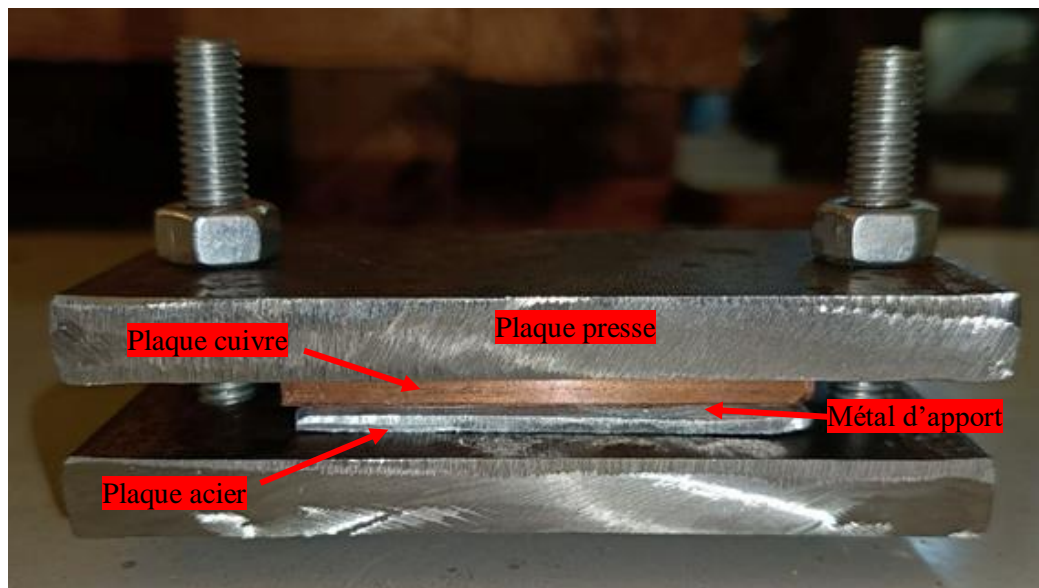


Figure 3.29: Montage pour le brasage au four.

Nous avons constaté que le brasage était bien réalisé et que l'adhésion entre les plaques était bonne. Les figures 3.40 et 3.41 montrent les coupes métallographiques des brasures réalisées sur les plaques acier – cuivre et les plaques acier – acier respectivement.

Dans le cas de la brasure acier – cuivre, il est probable qu’il y ait une couche intermétallique que l’on distingue le long de la bande claire de la brasure. Pour la brasure, nous ne pouvons pas nous prononcer au regard de la photo de la figure 3.40 et en l’absence du microscope électronique à balayage.

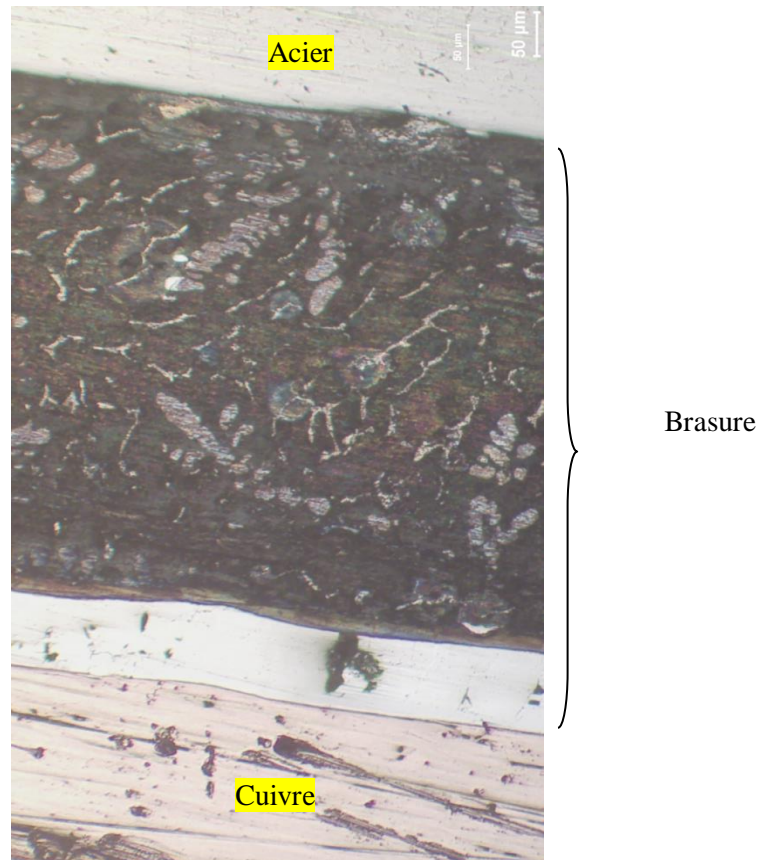


Figure 3.30: Coupe transversale du brasage avec la fusion 3 sur acier-cuivre.



Figure 3.31: Coupe transversale du brasage avec la fusion 3 sur acier-acier.

Les bons résultats des brasures de la fusion 3 au four nous ont encouragé à réaliser une autre coulée avec une composition suivante : Al 10%wt – Zn 35%wt – Sn 55%wt. L'étain est ajouté ici pour abaisser la température de fusion du métal d'apport. En règle générale, l'étain employé pour la soudure contient un alliage de plomb pour abaisser son point de fusion, bien que des alternatives sans plomb soient disponibles pour des raisons environnementales. Dans notre cas, nous avons de l'étain sans plomb. L'alliage que nous appellerons ici fusion 4, est coulé dans le four à fusion en introduisant d'abord l'aluminium pur à 99.9 %, ensuite nous ajoutons le zinc pur à 99.9 %. Lorsque ces deux éléments sont fusionnés, nous introduisons l'étain sous forme de fil. Une fois l'alliage devient liquide, il est coulé sur une plaque inoxydable pour former la feuille du métal d'apport qui sera utilisée pour la brasure. La figure 3.42 montre la feuille coulée issue de la fusion 4. A cause du manque de temps, seule une brasure au chalumeau oxyacétylénique a été réalisée. Le résultat est très satisfaisant. Nous obtenons une belle brasure, lisse et uniforme pratiquée sur deux plaques acier – acier. L'utilisation d'un thermomètre laser à infrarouge nous a permis d'estimer la température de fusion de la brasure située entre 350 °C et 450 °C.



Figure 3.32: Alliage coulé de ZnAlSn produit à partir de la fusion 4.

La coupe transversale de la brasure issue de la fusion 4 est montrée à la figure 3.33. Nous remarquons qu'il y a un bon écoulement du métal d'apport. Il y a des vides dans la brasure due probablement plus à la dextérité de l'opérateur que du métal d'apport.

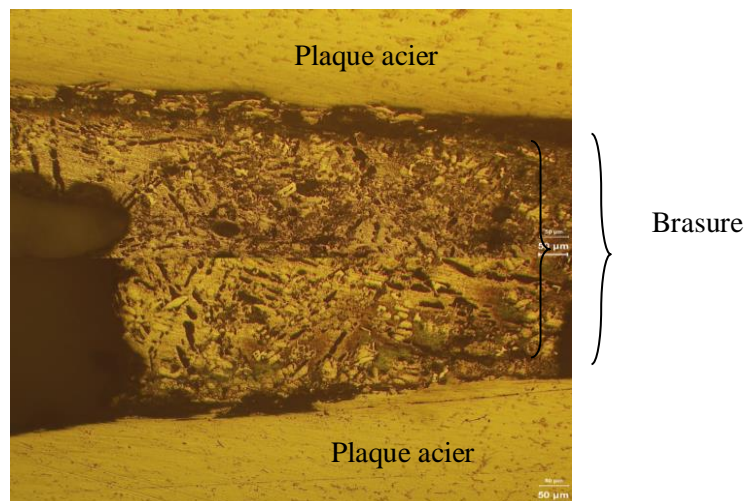


Figure 3.33: l'observation microscopique de brasage avec fusion 5.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Une thématique basée sur la brasure des métaux a été entamée dans ce travail. Le sujet qui paraissait au départ, demandait en fait beaucoup de connaissances et de pratiques pour réaliser une bonne brasure. De ce travail, nous tirons les principales conclusions ci-après :

-Pour les brasures tendres, le chalumeau Express est indiqué pour réaliser de bonnes brasures. Cependant toute bonne brasure doit être accompagnée d'une bonne préparation de surface.

-Le chalumeau oxyacétylénique est recommandé pour la brasure à l'argent ou 'fausse brasure'.

-Pour la brasure réalisée par chauffage par induction, il y a intérêt à employer une faible puissance de chauffe avec une grande intensité électromagnétique. Cela sera plus économique puisque la cadence de travail sera plus grande au vu des temps de brasures courts.

-une grande puissance de chauffe (20.2 kW) implique un chauffage trop important des pièces à braser et une fusion excessive de la brasure ;

-une puissance de chauffe faible (3.1 kW) implique un faible chauffage des pièces à braser, une meilleure fusion du métal d'apport avec l'augmentation de l'intensité du champ électromagnétique et une réduction du temps de chauffe.

-Une étude plus poussée du broyage mécanique doit être menée pour optimiser les tailles des poudres ainsi que l'uniformité de leur composition chimique. La disparité des compositions chimiques des particules n'a pas aidé à la fusion complète des pastilles. Les particules à proportion élevée en Cu ont certainement empêché la fusion de se faire. D'autre part, l'oxydation de l'aluminium dans les particules à haut pourcentage d'Al rendait difficile la fusion complète de celles-ci.

-Enfin, nous croyons qu'à défaut de faire la brasure dans un four à atmosphère sous vide, une atmosphère protectrice aurait aidé à mieux à réaliser la brasure.

References bibliographies

- [1] Introduction to Brazing Technology (P.M. RRobbertts)
- [2] BRASAGE par (Tchernogorov E.P).
- [3] Brazing (Mel M. Schwartz).
- [4] Introduction to Brazing Technology (P.M. Roberts)
- [5] <https://fr.boydcorp.com/blog/dip-brazing.html>
- [6] <https://hilelectronic.com/fr/wave-soldering/>
- [7] <https://soudax.com/family/brasage-alternative-au-brasage-flamme-induction-soudage/>
- [8] Brazing filler metals (Matthew Way, Jack Willingham & Russell Goodall)
- [9] https://www.cdiscount.com/bricolage/r-chalumeau+express.html#_his_
- [10] <https://www.acrossinternational.com/20kw-hi-frequency-split-induction-heater-w-timers-50-250khz.html>
- [11] <https://www.carlroth.com/be/fr/fours-a-moufle-etuves-haute-temperature/four-a-moufle---d%E2%80%99incineration-serie-aaf/p/xk54.1>
- [12] <https://www.hdsoudage.fr/fr/blog/le-guide-complet-pour-choisir-le-bon-chalumea.html>