



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Métallurgie

Spécialité : Génie Métallurgique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Kalthoum GUEMIDA

Le : lundi 8 juillet 2019

Recyclage des déchets d'aluminium et de ses alliages, issus du procédé de tréfilage

Jury :

Dr.	Youcef DJABLOUNE	MCB	Université de Biskra	Président
Pr.	Mosbah ZIDANI	Pr	Université de Biskra	Examineur
Dr.	Salim MESSAOUDI	MCB	Université de Biskra	Rapporteur

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu, le tout Puissant, pour tout.

*En premier lieu, je remercie mon encadreur monsieur **Salim, MESSAOUDI**, qui m'a guidé tout au long de la réalisation de ce modeste travail. Je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation et la rédaction de ce mémoire.*

*Je remercie vivement mes enseignants et membres de jury : monsieur **JABLOUNE Youcef** et monsieur **ZIDANI Mosbah**, d'avoir accepté de juger mon travail.*

Notre remerciement s'adresse également à tous mes professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Je remercie infiniment tout le personnel de la Bibliothèque, du laboratoire et du hall de pour leur aide et leur sympathie.

Enfin, dans l'impossibilité de citer tous les noms, mes sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont aidé par leurs conseils et leurs compétences à la réalisation de ce mémoire.

DEDICACE

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, que Dieu vous donne
santé et bonheur*

A mes frères et sœurs

A tous mes professeurs

A mes amis et collègues

*Et spécialement à Ahmed RAMZI pour son soutien inconditionnel, ses encouragements
et pour son aide dans ce travail.*

Merci d'être toujours là pour moi

Kathoun guemida

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Câble électrique en aluminium (série 6000) [3].....	6
Figure I. 2: Le cycle de vie des produits.....	7
Figure I. 3: Valeur marchande annuelle moyenne de l'aluminium (Source : LME).....	10
Figure II. 1: Photos de la boue prélevée	14
Figure II. 2: Présentation des zones des prélèvements dans la chaîne de la tréfileuse	16
Figure II. 3: Les étapes de nettoyages.....	19
Figure II. 4: Résultat de fusion de la boue à 700 °C pendant 20 minutes et 02 heures respectivement	24
Figure II. 5: Résultat de la fusion à l'air libre de la poudre nettoyée pendant 20 minutes à 900 °C, pendant 1 heure à 1000 °C et 1100 °C respectivement.....	25
Figure II. 6: Résultat de la fusion au procédé Oxygen free réalisée à 700 °C	26
Figure II. 7: Résultat de la fusion au procédé de la poudre dans un bain fondu réalisée à 1100 °C pendant 1 heure	27
Figure II. 8: La poudre compactée sous forme de pastille.....	28
Figure II. 9: Résultat de la fusion au procédé de la poudre compactée réalisée à 1000 °C pendant 20 minutes.....	28
Figure II. 10: Micrographie optique d'une zone fondue après solidification (sans charbon) agrandissement X20	29
Figure II. 11: Micrographie optique d'une zone fondue après solidification (avec charbon) agrandissement X 20	29
Figure II. 12: Poudre à l'état libre.....	30
Figure II. 13: Poudre consolidée (Compactée).....	30
Figure II.14 : Représentation schématique de la pastille fondue.....	32
Figure II.15 : Pastille fondue.....	32

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau II 1: Les modes opérations du nettoyage.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau II 2: Illustration des fusions effectuées.....</i>	<i>22</i>

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Etudes bibliographiques

I.1 Introduction 2

I.2. Généralités sur l'aluminium et ses alliages 2

I.2.1. L'utilisation de l'aluminium..... 2

I.2.2. Diversité des alliages d'aluminium 3

I.2.3. Les alliages d'aluminium utilisés dans la fabrication des câbles électriques..... 5

I.3. Généralité sur le recyclage 6

I.3.1. Le cycle de vie des matériaux et des objets 6

I.3.2. Les différentes formes du recyclage..... 8

I.3.3. Intérêt du recyclage de l'aluminium..... 9

I.3.4. Statistiques générales 9

Références bibliographiques de chapitre I

Chapitre II : Etudes expérimentales

II.1. Introduction..... 13

II.2. Matériau Etudié..... 13

II.3. Analyse de la boue..... 14

II.4. Démarche expérimentale 15

II.4.1. Localisation des pertes et prélèvement des échantillons..... 15

1. La zone de la chaîne de tréfilage	15
2. La zone des dresseuses	15
II.4.2. Nettoyage et préparation des poudres	17
II.5. Techniques de préparation et d'analyse	20
1. Le découpage	20
2. Le polissage mécanique	20
3. L'attaque chimique	20
II.5.1. L'analyse micrographique	20
1. Microscope optique	20
II.6. Description du procédé Oxygène Free	21
II.7. Déroulement et évolution des essais de fusion	21
II.7.1. Fusion de la boue	22
II.7.2. Fusion à l'air libre de la boue nettoyée	24
II.7.3. Fusion de la poudre par le procédé "Oxygen Free"	25
II.7.4. Fusion de la poudre dans un bain fondu	26
II.7.5. Fusion de la poudre compactée (pastille)	27
II.8. Discussion	29
Conclusion générale	33
Perspectives	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

L'aluminium est l'un des métaux les plus exploités par les secteurs industriels ; on le trouve dans l'aéronautique, l'automobile, la construction, le transport d'énergie, ..., etc. Depuis son élaboration industrielle en 1886 grâce aux développements de l'électrolyse [1], sa production et son utilisation n'ont cessé de croître, et actuellement, c'est le métal qui connaît la plus forte croissance [1]. Incontestablement, c'est le métal le plus abondant dans la nature, mais cette abondance ne fait pas de lui une source inépuisable. Du fait, son recyclage est devenu une nécessité pour satisfaire la demande mondiale et qui contribue à la préservation de l'écosystème naturel.

Le recyclage d'aluminium et de ses alliages avait tout d'abord débuté en premier, dans les unités de production, par le recyclage des chutes (scrap) de fabrication. Ces chutes constituées d'un alliage connu étaient en général recyclées pour la production d'un alliage identique dans la fonderie même, ou en mélange avec le métal vierge provenant de l'électrolyse d'alumine [2]. Et depuis, cette politique s'est élargie vers le recyclage de tous les autres déchets d'aluminium et de ses alliages.

Dans cette modeste étude, nous nous intéressons au recyclage des poudres issues du procédé de tréfilage d'aluminium et un de ses alliages dénommé AGS. Dans ce travail, nous allons tenter de recycler ces poudres par le procédé : Oxygen Free. L'aluminium étant connu comme un élément très réactif avec l'oxygène, ce procédé sera appliqué avec l'ajout d'une couche en charbon de bois servant de barrière protectrice contre l'oxydation. Au cours de ce travail, des poudres brutes et des poudres nettoyées subiront une fusion entre 700 °C et 1100 °C. Nous avons opté pour ce procédé parce qu'il semble simple et facile à réaliser et économique. Cette tentative nous servira d'indication sur l'applicabilité et l'efficacité de ce procédé sur le recyclage des poudres d'aluminium et de l'AGS.

Cette étude est partagée en deux chapitres :

Le premier chapitre : est une synthèse bibliographique sur le recyclage de l'aluminium et sur ses alliages.

Le deuxième chapitre : présente le travail expérimental réalisé ; illustre le matériau étudié, les techniques expérimentales utilisées, les résultats obtenus et les interprétations attribuées.

Ce manuscrit, sera clôturé par une conclusion générale où l'on résume les principaux des résultats obtenus.

CHAPITER I :
ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES

I.1 Introduction

Depuis les débuts de l'industrie de l'aluminium, soit en 1886, plus de 700 millions de tonnes d'aluminium ont été produites. Encore aujourd'hui, environ 73 % de cette production est en phase d'usage. Ces chiffres font de l'aluminium le second métal le plus utilisé au monde après l'acier [3].

Le développement des applications de l'aluminium et de ses alliages, la croissance régulière et soutenue de la consommation s'expliquent par plusieurs propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisateurs, en particulier dans les transports, le bâtiment, l'industrie électrique et l'emballage [4].

Cette consommation si forte avait généré de grandes quantités de déchets de divers objets comme : les canettes, boîtes alimentaires, aérosols...etc. pour diminuer la quantité de déchets et préserver les ressources naturelles le recyclage était une nécessité.

I.2 Généralités sur l'aluminium et ses alliages

L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendeleïev, son nombre atomique est 13, sa masse molaire est 26.28 g/mol [5], L'aluminium est un métal blanc argenté très malléable [6], ayant des propriétés attrayantes comme la faible densité (2,7 g/cm³), la bonne conductivité thermique et électrique, le point de fusion bas, la facilité de mise en forme et un coût relativement bas [7]. Et il possède d'excellentes propriétés de résistance à la corrosion atmosphérique, aqueuse, par les huiles et par d'autres produits chimiques. Certains alliages d'aluminium possèdent notamment des résistances mécaniques semblables à celles d'aciers structuraux. De plus, c'est en raison de sa structure c.f.c. que l'aluminium conserve sa ductilité même à très basse température [8].

I.2.1. L'utilisation de l'aluminium

Les alliages d'aluminium sont utilisés pour :

- **Légereté**

L'aluminium est léger et de plus il possède des caractéristiques mécaniques très élevées [4]. Il constitue de ce fait 80% du poids des avions actuels. Il est très utilisé aussi dans le transport

(25%) (Terrestres rapides TGV et maritimes, et de plus en plus dans l'automobile), le bâtiment (20%), l'emballage (20%). On l'utilise aussi dans la construction électrique et la construction mécanique (10%) [5].

- **Conductivité électrique et thermique**

L'aluminium offre une excellente conductivité électrique pour un poids inférieur à celui du cuivre. C'est pour cela qu'on le retrouve de plus en plus utilisé pour les lignes à haute tension.

A l'instar du cuivre, l'aluminium, en plus d'une bonne conductivité électrique procure également un fort pouvoir caloporteur ce qui explique par exemple sa présence dans les dispositifs de refroidissements.

- **Tenue à la corrosion**

L'aluminium et les alliages ont en général une bonne tenue à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain, industriel. L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes dans le bâtiment. Tout en offrant de nombreuses possibilités de formes et de traitements de la surface, les structures de bâtiment en aluminium demandent peu d'entretien et résistent bien dans le temps [4].

- **Aptitude aux traitements thermiques**

Les traitements thermiques ont pour objet de modifier les propriétés du matériau afin de l'adapter à une utilisation précise. Généralement les traitements thermiques entraînent la variation des caractéristiques telle que : la conductivité électrique, la résistance mécanique, l'aptitude au filage, à l'emboutissage, la résistance au fluage...etc [6].

I.2.2. Diversité des alliages d'aluminium

Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont abouti à proposer une gamme étendue de nuances, bien adaptée aux utilisations envisagées. Tellement nombreux, les alliages d'aluminium sont regroupés conformément à une nomenclature rigoureuse et complexe. Ainsi le métal pur non allié constitue la série 1000 et les autres séries dépendent de la nature de l'élément d'alliage principal (2000 pour le Cu, 3000 pour le Mn, 4000 pour le Si, 5000 pour le Mg, 6000 pour le Mg et le Si, 7000 pour le Zn [4].

L'aluminium se retrouve dans les produits de consommation sous la forme d'alliages. En fait, il existe deux grandes familles d'alliages [3], nous examinerons successivement :

-les alliages de corroyage : la mise en forme du métal s'effectue, dans ce cas, par laminage, filage, forgeage ;

-les alliages de fonderie : la mise en forme du métal s'effectue par le moulage.

- **Alliages de corroyage**

▪ **Alliages aluminium-cuivre : série 2000**

Le cuivre améliore les caractéristiques mécaniques, l'usinabilité, la forgeabilité, la résistance au fluage. Mais il réduit la soudabilité et la résistance à la corrosion.

▪ **Alliages aluminium-manganèse : série 3000**

Le manganèse allié à l'Al permet d'obtenir une bonne résistance à la corrosion et une bonne aptitude à l'emboutissage.

▪ **Alliages aluminium-magnésium : série 5000**

Très bonne résistance à la corrosion, bonne soudabilité et bonne usinabilité, aptitude à l'anodisation.

▪ **Alliages aluminium-magnésium-silicium ou AGS : série 6000**

Ce sont les alliages de filage par excellence, pour tous les types de profilés d'usage courant avec ou sans anodisation.

▪ **Alliages aluminium-zinc : série 7000**

Ces alliages ont les meilleures caractéristiques mécaniques et sont très employés dans l'aéronautique. Ils doivent être protégés contre la corrosion.

Finalement, l'étain est aussi utilisé dans les alliages pour coussinets (propriétés de frottement) sous forme d'un alliage aluminium-étain à 6 % par exemple.

Le nickel améliore la résistance au fluage ; il est utilisé dans les alliages pour pistons et pour les pièces de forge.

Le chrome est, dans certains cas, un complément du manganèse pour réduire le risque de formation de criques [2].

- Alliages de fonderie

Les alliages de fonderie sont, pour la plupart, des alliages Al-Si ou Al-Si-Cu [2]. La série **2xx.x** contient du cuivre qui donne une bonne résistance mécanique et thermique à l'alliage. Il faut cependant utiliser un revêtement anticorrosion sur ce type d'alliage. La série **3xx.x** regroupe les alliages de moulage les plus utilisés. Ils sont constitués d'aluminium, de silicium et de cuivre. Le silicium améliore la coulabilité du liquide, réduit le risque de formation de criques et minimise la porosité par retrait. Les alliages de la série **4xx.x** contiennent aussi du silicium et quelques fois du cuivre, du fer ou du nickel. La série **5xx.x** contient du magnésium, tandis que la série **7xx.x** contient du zinc, du magnésium et du chrome. Les alliages de la série **8xx.x** contiennent plutôt de l'étain et du cuivre qui leur confèrent une bonne résistance mécanique et une bonne coulabilité [3].

I.2.3. Les alliages d'aluminium utilisés dans la fabrication des câbles électriques

Les alliages sans cuivre ont une résistance à la traction légèrement plus forte de celle des alliages de la série 6XXX. . La résistance à la traction varie de 125 à 400 N/mm². Ils sont des alliages aluminium-magnésium-silicium.

D'autre part, ils sont beaucoup moins sensibles à la trempe et il faut refroidir à l'air pour une épaisseur de paroi beaucoup plus grande. Les alliages contenant le cuivre atteignent la plus haute résistance de tous les alliages d'aluminium, excédant l'acier de construction normal. L'expulsion est très pauvre et les alliages ne sont pas soudables au-dessous des conditions normales. La figure **I.1** montre l'utilisation des alliages de la série 6000 dans les câbles électriques [5].



Figure I. 1 : Câble électrique en aluminium (série 6000) [5].

I.3. Généralité sur le recyclage

Le recyclage des métaux non ferreux est une activité industrielle déjà ancienne, justifiée principalement par le fait qu'il n'existe aucune différence notable entre le métal primaire extrait du minerai (métal raffiné) et le métal secondaire issu des déchets (métal affiné).

En plus d'être beaucoup moins cher que le raffinage, le recyclage permet en outre une économie des réserves mondiales de ces métaux, relativement peu abondantes et pour la plupart épuisées dans moins d'un siècle.

En règle générale, ces métaux n'ont pas d'âge, et leur qualités ne s'altèrent pas avec le temps, hormis quelques phénomènes mineurs d'oxydation : ils peuvent être récupérés à partir d'un produit en fin de vie, même plusieurs décennies après sa mise sur le marché [9].

I.3.1 Le cycle de vie des matériaux et des objets

La vie d'un matériau ou d'un objet se déroule suivant 4 grandes étapes (**figure I.2**) :

1. production / élaboration du matériau à partir de la matière première puisée initialement dans les ressources naturelles.
2. fabrication d'objets par transformation du matériau.
3. utilisation de l'objet.
4. fin de vie de l'objet.

Cette dernière étape intervient lorsque l'objet ne remplit plus les fonctions pour lesquelles il a été créé, ou encore parce que son propriétaire en a décidé ainsi.

L'objet devient alors un déchet (nous donnerons plus loin la définition de ce terme), dont l'existence peut suivre trois voies :

- stockage, dans le meilleur des cas sur des aires aménagées, ou bien abandon dans la nature.
- incinération pour en extraire son énergie ou pour réduire son encombrement.
- réintroduction dans la chaîne de production des matériaux et nouvelle transformation en objet.

Cette dernière alternative est nommée par le terme générique de « recyclage » [10].

Le « **recyclage** » est la création de nouvelles matières, ou le renouvellement des matières initiales, par le biais du traitement des déchets, (cela comprend le recyclage organique mais pas le recyclage énergétique) [9].

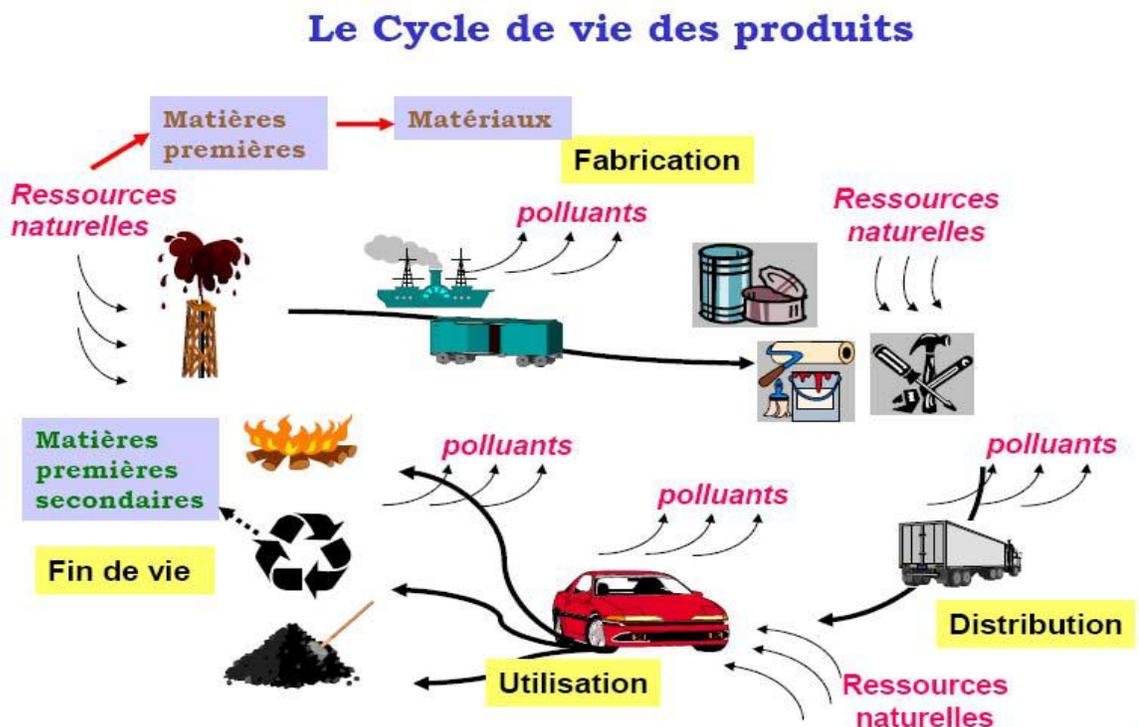


Figure I. 2: Le cycle de vie des produits

I.3.2. Les différentes formes du recyclage

L'habitude est de désigner par « recyclage » toute opération visant à réintroduire des déchets dans un circuit de transformation. Toutefois, la grande diversité des situations de recyclage fait qu'un vocabulaire adapté a vu le jour.

Ces définitions nous permettent de conclure que la valorisation englobe ainsi plusieurs opérations, dont le recyclage, qui visent à donner de la valeur à un déchet.

Sur un plan technologique, on distingue deux situations de recyclage :

- dans la première, on réintroduit le déchet dans la chaîne de transformation pour donner un produit identique, c'est le recyclage en « **boucle fermée** » [10].

C'est en général aux produits corroyés (laminés ou extrudés) que ce mode de recyclage s'applique.

Les exemples caractéristiques que donner en raison des tonnages considérables dont ils sont l'objet, sont :

-les **boîtes boissons** en aluminium, constituées principalement de deux alliages différents qui se recyclent aisément pour fabriquer à nouveau l'alliage pour corps de boîte (900 000 t/an recyclé aux Etats-Unis) ;

-les **profilés du bâtiment** qui seront réutilisés seuls ou en mélange avec d'autres matières premières pour fabriquer des billettes destinées à l'extrusion, billettes dites de première ou deuxième fusion dont les propriétés sont très voisines [2].

- dans la seconde, la transformation conduit à la fabrication de produits différents, on parle alors de recyclage en « **boucle ouverte** » [10].

. Cette activité est couramment désignée par les termes, **deuxième fusion** ou **affinage**, elle permet de produire :

-des alliages de moulage de deuxième fusion (85 à 90 %) ;

-des alliages de désoxydation (10 à 15 %) titrant 98,96 voire seulement 92 % d'aluminium.

L'activité de l'affinage, de par la plus grande diversité et complexité de ses matières premières, requiert des moyens de traitement et de fusion plus diversifiés et souvent plus complexes que le recyclage en boucle fermée [2].

I.3.3. Intérêt du recyclage de l'aluminium

Le recyclage de l'aluminium présente un avantage principal comparativement à d'autres métaux, qui consistent en sa capacité d'être recyclé à répétition sans perdre ses propriétés physiques malgré les pertes dues à l'oxydation et la contamination par quelques impuretés [3]. Et aussi un autre avantage, et non pas des moindres : il permet d'économiser les ressources naturelles (matière première et énergie) dans lesquelles on puise pour fabriquer les matériaux neufs, et dont on prend conscience de la raréfaction. Ainsi, en appliquant ce principe, plusieurs objectifs fondamentaux sont atteints : la préservation des ressources naturelles, la protection de l'environnement, la diminution de la quantité de déchets tout en préservant les activités de production et de consommation, piliers des économies modernes [10].

I.3.4. Statistiques générales

L'aluminium est un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. La refusion de l'aluminium ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir du minerai.

L'expérience de plusieurs dizaines d'années de récupération des « vieux métaux » montre que les déchets d'aluminium ont toujours une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles [4].

Le commerce international de l'aluminium assure un approvisionnement continu et stable aux manufacturiers. Il existe également un commerce international des déchets neufs ou des vieux débris d'aluminium utilisés principalement par les unités de deuxième fusion, c'est-à-dire par les entreprises qui recyclent l'aluminium, ainsi qu'un commerce d'aluminium recyclé. La valeur marchande de l'aluminium de première et de deuxième fusion est dictée par la Bourse des Métaux de Londres (LME) qui est le marché mondial le plus important dans le secteur des métaux d'échange. La figure I.3 montre l'évolution dans le temps du prix de l'aluminium pour les échanges au comptant. Nous constatons que la valeur marchande de l'aluminium recyclé est inférieure à celle de l'aluminium de première fusion et qu'elle subit des variations de prix semblables.

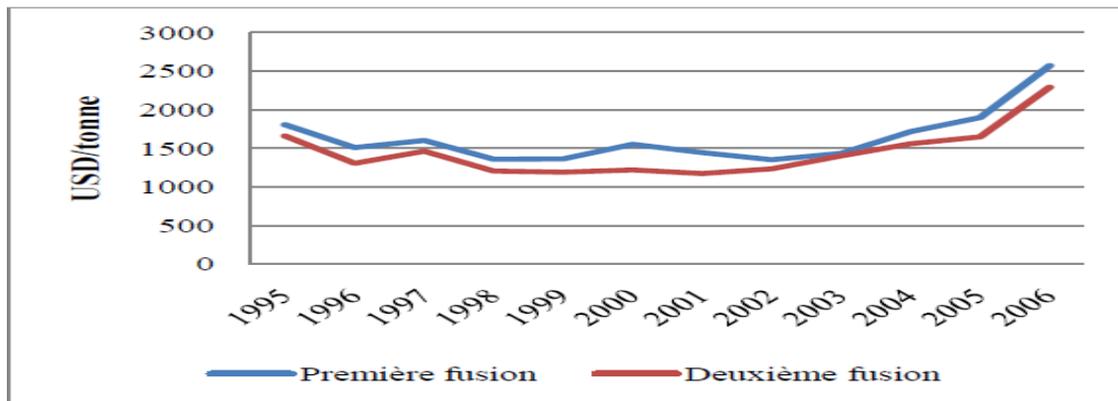


Figure I. 3: Valeur marchande annuelle moyenne de l'aluminium (Source : LME)

Cet accroissement de la demande en aluminium n'est pas ressenti uniquement dans le domaine des transports, mais également dans l'ensemble des secteurs économiques reliés à l'industrie de l'aluminium : construction et bâtiments, machineries et équipements, emballages, biens de consommations, etc [3].

Références bibliographiques de chapitre I

- [1] Laurent Dubourg, "Développement d'alliages de surface élaborés sous faisceau laser sur substrat aluminium : application au rechargement de surface", thèses de doctorat, l'université Louis PASTEUR-Strasbourg I (2002), pp : 11.
- [2] François HERBULOT. M 2 347, pp : 161. Technique Ingénieur.
- [3] LATRÉMOUILLE-VIAU, Julie "TRAITEMENT EN FIN DE VIE DES AVIONS ET VALORISATION DE L'ALUMINIUM", Maîtrise ès sciences appliquées, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL (2009), pp : 5.
- [4] Elena Luminița DIN – ȘTIRBU, "Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage", thèses de doctorat, L'UNIVERSITE de PITESTI (Roumanie) (2005), pp : 1-8.
- [5] Ines HAMDI, "Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000)", thèses de doctorat, Université de Biskra (2014), pp : 24.
- [6] Fatima Zohra LEMMADI, "Caractérisations des alliages à base d'aluminium et étude de l'effet des traitements thermiques sur la microstructure et la taille des grains" thèses de doctorat Université de Biskra (2014), pp : 3-6.
- [7] Tambi Ramdé*, Lucien Bonou, Boubié Guel, Jean Boukari Legma, "Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium recyclés pour la confection de marmites", J. Soc. Ouest-Afr. Chim. (2008) 026 ; pp : 113 – 121.
- [8] Faculté Polytechnique de Mons – Service de Métallurgie, Cours de Science des Matériaux 1 – 2ème partie : Connaissance des matériaux métalliques (0502-22) (2007-2008), pp : 106.
- [9] Projet tutoré DUT 1ère année, (2008), pp : 5-20.
- [10] Mamadou Babacar Ndiaye. Le recyclage de métaux d'origine industrielle au Sénégal. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale de Lyon ; Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar (Sénégal), 2006. Français. <tel-00455171>, pp : 6-7-13.

CHAPITER II :

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

II.1. Introduction

Au cours du tréfilage, le matériau tréfilé perd un peu de sa matière sous forme de poudre au contact des filières. Cette poudre se mélange au lubrifiant à la sortie de la filière puis elle est entraînée en bas dans le bac de la chaîne ou elle apparaît sous une forme de boue de couleur grise foncée comme on peut le voir sur la figure **II.1**.

Dans ce travail expérimental, nous allons tenter de recycler (récupérer) cette poudre métallique par le procédé de fusion classique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le matériau étudié, les différentes opérations d'extraction (états brutes et état nettoyé) de la poudre des boues collectées, nous allons aussi exposer les essais de fusion réalisés et les résultats obtenus et les interprétations associées.

Pour la réalisation de cette étude, des techniques d'analyse et de caractérisation ont été prévues. Mais uniquement la métallographie optique, et la microdureté ont pu être réalisées, cependant, les deux autres techniques importantes pour cette étude, à savoir la diffraction des rayons x, et l'EDS par microscopie électronique à balayage (MEB), n'ont pas pu être effectuées par faute de moyens.

II.2. Matériau Etudié

Le matériau étudié est la poudre d'aluminium et la poudre de l'alliage Al-Mg-Si de désignation AGS 6061 issues du procédé de tréfilage. Ces poudres sont extraites de la boue prélevée du bac d'en bas de la chaîne de tréfilage. En vue des conditions de l'usine aux moments des prélèvements on ne peut pas se prononcer sur la nuance exacte de la poudre ; la chaîne étant à l'arrêt mais les deux nuances étaient déjà tréfilées au-paravent à intervalle séparée sur la même chaîne et la dernière était la nuance de l'aluminium.



Figure II. 1: Photos de la boue prélevée

II.3. Analyse de la boue

Comme nous l'avons déjà mentionné dans le paragraphe **II.1**, une analyse de composition chimique de la boue collectée était prévue avant d'entamer tout essai de fusion. Cette analyse nous renseignera sur les éléments chimiques présents dans la boue et nous aidera à adopter les méthodes nécessaires quant à l'élimination des poudres et des composés indésirable (éléments indésirable). Mais comme cette analyse est absente dans ce travail, les seules connaissances qu'on a sur la composition de la boue sont les poudres issues des fils et des filières, les composés organiques du lubrifiant et certainement des poussières de l'environnement des machines. Les poudres issues des fils tréfilés, représentent l'élément recherché, et sont présentes dans la boue avec des quantités importantes. Par contre les poudres de carbures issues des filières sont présentes avec des petites quantités et ne peuvent être négligées et sont généralement difficiles à éliminer. Il est très difficile d'estimer la quantité des poussières dans la boue mais elles doivent être considérées. La matière du lubrifiant constitue la masse globale de la boue et peut être éliminée au cours des étapes de nettoyage et d'extraction.

II.4. Démarche expérimentale

II.4.1. Localisation des pertes et prélèvement des échantillons

Pour pouvoir localiser les endroits de perte de masse du fil lors de l'opération de tréfilage, nous avons effectué une visite minutieuse de toute la chaîne de production de la bobine du fil machine au cabestan. Nous avons ainsi identifié plusieurs endroits où il y avait des accumulations de poudres. Tous les endroits identifiés étaient dans la zone des dresseuses et dans la zone de la chaîne de tréfilage.

1. La zone de la chaîne de tréfilage :

Ou le bac des tréfileuses, ce bac se trouve en bas des tréfileuses et destiné à la collecte des poudres et du lubrifiant ; comme c'est illustré sur la figure **II.2**. Les poudres de la chaîne de tréfilage sont produites par frottement entre le fil et les filières, et en se mélangeant au lubrifiant il se forme une boue aqueuse apparente à la couleur du fil tréfilé, comme on peut le voir sur la figure **II.2**.

2. La zone des dresseuses :

Les dresseuses localisées sont toutes situées en amont de la chaîne de tréfilage et comportent quatre points d'accumulation de poudres. Les poudres produites dans la zone des dresseuses étaient sèches et en quantité minime en comparaison avec celles du bac de la chaîne de tréfilage.

Dans notre travail c'était prévu que le prélèvement s'effectue à partir des deux zones précédemment citées. Mais comme la chaîne de tréfilage de l'aluminium et de l'AGS était à l'arrêt pendant la durée de notre travail, on s'est contenté du prélèvement effectué de la chaîne de tréfilage.



**Bac de la
chaîne de
tréfilage**

La boue



Figure II. 2: Présentation des zones des prélèvements dans la chaîne de la tréfileuse

II.4.2. Nettoyage et préparation des poudres

La poudre collectée se trouve à l'état de boue visqueuse, il donc nécessaire de la nettoyer. Le nettoyage comporte les opérations préalables de dégraissage, de lavage, de rinçage et les opérations d'élimination des résidus et rebus indésirables pouvant s'y trouver. L'opération se fait à l'aide de produits détergents choisis en fonction des rebuts et du support.

Le dégraissage a été effectué avec de l'essence (d'hydrocarbure) ; une quantité d'essence est ajoutée à la boue jusqu'à sa submersion totale. On remue l'ensemble pendant deux à trois minutes avec une tige à la main ou à l'aide d'un agitateur magnétique qui sert de séparation magnétique au fer. Cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à ce que le bain ait la couleur de l'essence. Puis on procède au lavage à l'aide du savon et de l'eau chaude. Cette étape est aussi refaite plusieurs fois jusqu'à ce que l'eau apparaisse claire et limpide. Après cette opération on procède au rinçage avec de l'eau chaude du robinet. Après le rinçage la poudre est mise à l'abri des poussières pour séchage à l'air libre.

Après nettoyage et pesée nous avons constaté qu'environ 90% de la masse initiale de la boue était du lubrifiant.

La figure **II.3** et le tableau **II.1** illustrent et résume l'opération du nettoyage effectué.

Tableau II 1: Les modes opérations du nettoyage

Etape(s)	Action(s)
Prélèvement	<ul style="list-style-type: none">• Identification des zones de perte dans la chaîne de production.• Zones identifiées : deux zones ; zone des dresseuses et zone des tréfileuses).• Prélèvement effectué uniquement depuis la chaîne de tréfilage
Dégraissage	<ul style="list-style-type: none">• Poudre boue + essence + temps de contact + décantation + purification.
Lavage	<ul style="list-style-type: none">• Eau (100C°) + savon + action mécanique (agitation) + temps pour se décanter + purification.
Rinçage	<ul style="list-style-type: none">• Eau claire (100C°).
Séchage	<ul style="list-style-type: none">• Laisser sécher à l'air.

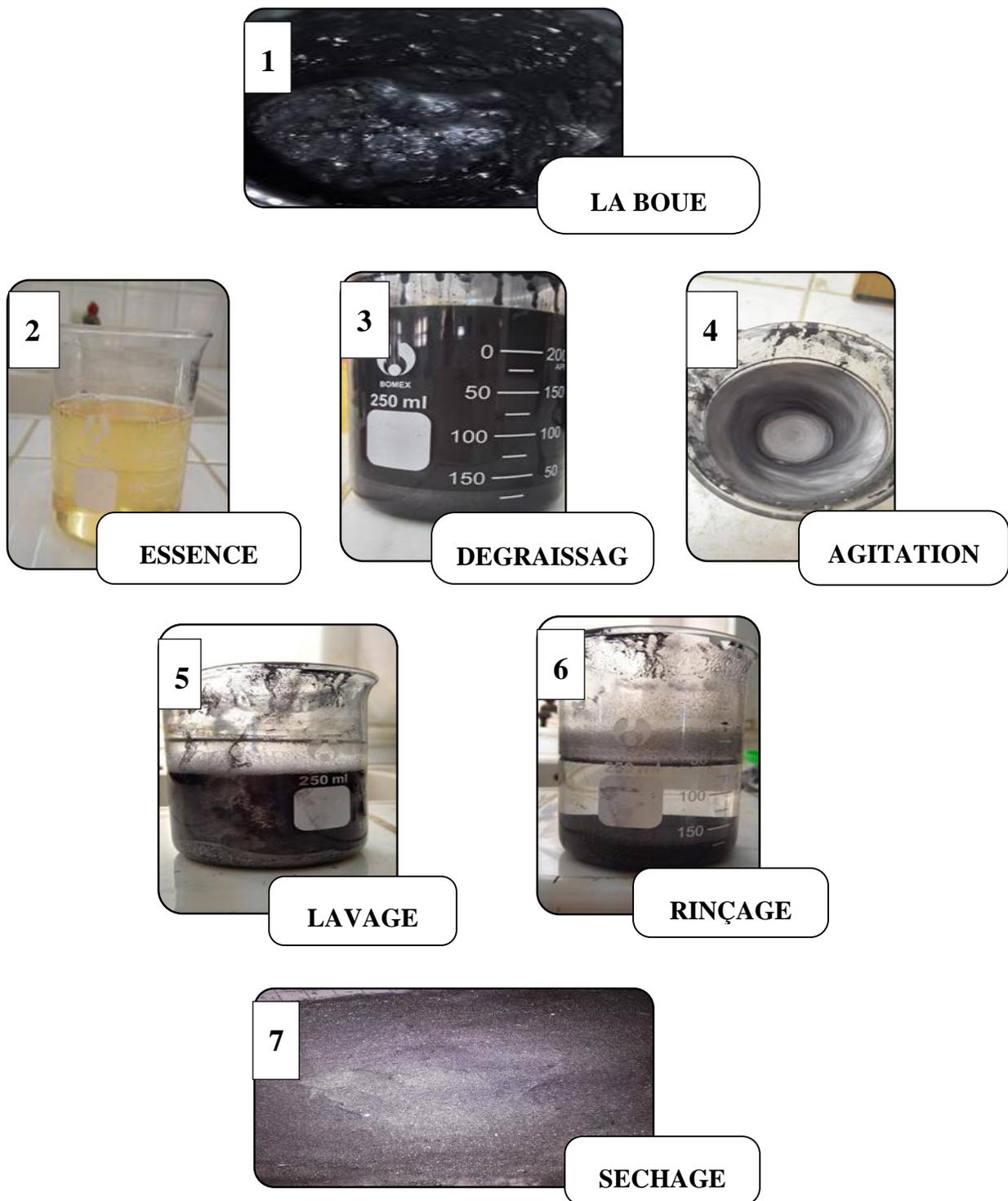


Figure II. 3: Les étapes de nettoyages

II.5. Techniques de préparation et d'analyse

Après réussite la fusion par ce procédé de compactage, nous avons effectuée de la préparation des échantillons pour l'analyse micrographique se fait sur des surfaces propre et attaquée chimiquement. Pour obtenir cette surface nous effectuons différentes étapes :

1. Le découpage

Le découpage des pastilles était manuellement effectuée à l'aide d'une scie à métaux sont découpée en deux partie.

2. Le polissage mécanique

Après le découpage on obtient une surface très rigoureuse, pour résoudre ce problème de surface, on polit les échantillons sur une polisseuse (PHOENIX ALPHA d'ANALIS.) avec des papiers abrasifs de différentes granulométries de 120 à 1200. Avant le passage vers une granulométrie inférieur, l'échantillon est nettoyé à l'aide de l'eau distillée. Le polissage définitif a été réalisé sur un tissu feutré avec addition du lubrifiant et de la pâte diamantée. Les échantillons sont nettoyés et séchés.

3. L'attaque chimique

Pour l'observation optique l'attaque chimique a été réalisée à l'aide de l'acide fluorhydrique 40%.

II.5.1. L'analyse micrographique

1. Microscope optique

La microscopie optique nous permet d'observer la microstructure de matériau étudié. Les échantillons sont observés à l'aide d'un microscope de type Optika B-500 MET, MICROSCOPES -ITALY. Les grossissements utilisés vont de X20. Le principal intérêt de cette méthode simple et efficace est la mise en évidence de la microstructure du matériau.

II.6. Description du procédé Oxygène Free

Dans notre cas et vu que on a pris en considération le facteur économique comme associé à l'expérimentation, on a opté pour l'utilisation d'un agent moins coûteux que le gaz inerte et le vide, donc on a utilisé le charbon comme agent de garde contre l'oxygène. Ce choix est basé sur l'affinité des éléments entre eux et vu que l'oxygène à une affinité chimique pour carbone plus grande que pour l'aluminium, il sera capté par le charbon actif et ne peut passer dans la fusion.

L'application de cette méthode se fait par l'ajout d'une quantité de charbon de bois sur la poudre d'aluminium posé au fond du creuset pour jouer le rôle d'une barrière entre l'aluminium et l'oxygène.

Ce procédé est décrit comme étant un protocole de fusion sans oxygène c'est à dire sous une atmosphère contrôlé. Cette atmosphère contrôlé peut être réalisé par nombreux méthodes, les plus utilisés sont la fusion sous pression réduite et/ou par l'admission d'un gaz inerte ; dans ces deux cas la quantité d'oxygène restante dans l'enceinte n'aura pas d'effet sur produit.

II.7. Déroulement et évolution des essais de fusion

Pour réaliser la fusion, on met une quantité de matière à fondre (boue ou poudre nettoyée) dans un creuset réfractaire en céramique. Dans le cas où la fusion sera réalisée par la technique de l'"Oxygen Free", une couche de poudre du charbon de bois est ajoutée au-dessus. Le creuset est ensuite placé dans le four à la température ambiante ou porté à la température de fusion pour accélérer la fusion sous pression atmosphérique. Après maintien, on retire le creuset pour voir l'état de la fusion et procéder à la coulée ou tout simplement laisser refroidir l'ensemble à l'air libre.

Tableau II 2: Illustration des fusions effectuées

fusions	T _f (C°)	Les temps	Etat de la poudre	Charbon (sans/avec)	Séparation magnétique
Fusion de la boue	700	30 min maintien	boue	Sans	/
	700	2h maintien	boue	Sans	/
Fusion à l'air libre	900	20 min maintien	nettoyée	Sans	/
	1000	1h maintien	nettoyée	Sans	/
	1100	1h maintien	nettoyée	Sans	Avec
Fusion par "Oxygen Free"	700	20 min maintien	nettoyée	Avec	/
Fusion dans un bain fondu	1100	1h maintien	nettoyée + massif	Sans	Avec
Fusion de la poudre compactée	1000	20 min maintien	pastille	sans/avec	Avec

II.7.1. Fusion de la boue

Dans cette opération nous allons tenter, en première approximation, de voir la fusion de la poudre à l'état brut (état de boue). Ces essais ont été réalisés dans le but de voir l'effet du lubrifiant sur la fusion des poudres métalliques de l'aluminium et de l'AGS. Est-ce que le lubrifiant organique jouera le rôle d'une barrière protectrice contre l'oxydation de la poudre pendant le traitement ou comme on le prévoit s'évaporerà à des températures inférieures ou très inférieures à celles de la fusion des poudres métalliques ? Donc, deux cas de figures sont possibles. Dans le cas de l'évaporation du lubrifiant, le chauffage sert d'étape d'élimination au lubrifiant. Toutefois, il faut prévoir et penser aux réactions de combustion susceptibles de se

produire au cours du chauffage et qui conduiront à la formation de cendres solides qui peuvent rentrer ensuite dans le fondu.

Pour réaliser cette fusion une quantité de boue est placée dans un creuset et introduite dans un four à la température et à l'air ambiante et à la pression atmosphérique. Le creuset est ensuite porté à 700 °C pendant 20 minutes et 2 heures puis sorti du four pour le refroidissement.

Après refroidissement, nous n'avons constaté que la quantité de boue introduite à nettement baissée après chauffage, ceci dit qu'une grande quantité des composés du lubrifiant s'est volatilisée au cours du chauffage. Dans un seul essai, nous avons remarqué la formation d'une couche sur une petite zone grise claire étendue différente de celle la surface de la boue chauffée. Cette zone s'est fracturée au moment de la séparation et a laissé un vide comme on peut le voir sur la figure sur la photo (a) de la figure II.4. Cette couche semble être le résultat d'une fusion de la poudre métallique qui a jaillit en surface après la formation d'une bulle du métal fondu. Ce type de résultat ne s'est produit qu'une fois durant cette opération et on n'a pas pu le reproduire après. Dans les autres essais, le chauffage ne donne pas la fusion recherchée mais conduit à la formation d'un agglomérat de poudre peu adhérente de couleur grise claire qui se désagrège à la moindre pression. Ceci dit que la poudre métallique ne s'est pas fondue mais elle s'est transformée pendant le chauffage. Mais comme l'analyse chimique n'a pas été faite, il nous sera difficile de connaître la nature de la substance formée. Cependant, on peut toujours hypothéquer sur cette poudre ; en effet, l'aluminium est connu comme élément très affine à l'oxygène, on pense que la poudre obtenue n'est autre que l'alumine mélangée aux divers composés du lubrifiant pendant le chauffage.

En vue des résultats obtenus, on pense que la fusion de la poudre ne peut se produire dans la boue malgré la volatilisation d'une quantité importante des composés du lubrifiant. Nous allons, donc, tenter de poursuivre nos essais sur des poudres nettoyées.

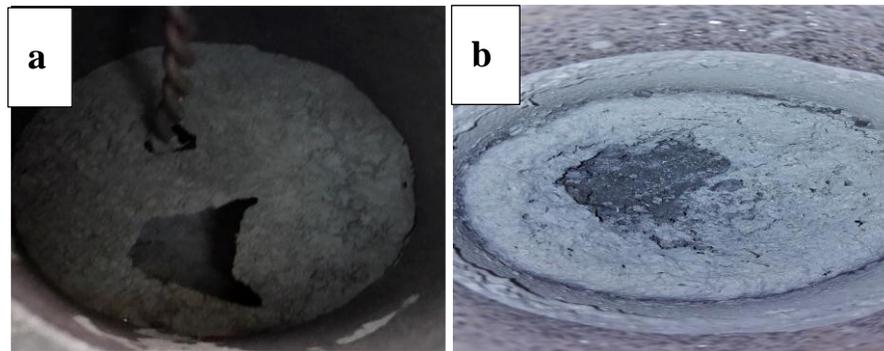


Figure II. 4: Résultat de fusion de la boue à 700 °C pendant 20 minutes et 02 heures respectivement

II.7.2. Fusion à l'air libre de la boue nettoyée

Comme les précédents essais n'ont pas même pas abouti à une fusion de la boue, nous allons tenter la fusion de la poudre nettoyée. Cette poudre a été nettoyée comme indiqué dans le paragraphe II.4.2 avec l'agitateur magnétique, mais certains résidus comme les poussières du sable peuvent y rester encore. Cette fusion a été effectuée à l'air libre aux températures 900 °C, 1000 °C et 1100 °C proches de ce qui se fait en pratique pour les déchets massifs d'aluminium. Après refroidissement nous avons constaté qu'aucune fusion ne s'est produite et les poudres chauffées aggloméraient en agrégat massif plus au moins friable. L'analyse visuelle entre l'état initial et l'état final, montre un changement de couleur du gris argenté au gris foncé mateux. Nous avons remarqué également la formation de zones de couleur blanchâtre en surface des agglomérats, comme illustré par les photos de la figure II.5.

D'après ces résultats, on pense qu'il est maintenant clair que la poudre chauffée subissait une oxydation pendant le chauffage et se transforme en une substance réfractaire et qui ne fond pas à ces températures. Cette opération n'a pas abouti à la fusion souhaitée, nous devons donc essayer de réaliser la fusion en évitant l'oxydation de la poudre pendant le chauffage. Dans ce qui suit nous allons procéder à la fusion par la méthode de l'oxygen free.



Figure II. 5: Résultat de la fusion à l'air libre de la poudre nettoyée pendant 20 minutes à 900 °C, pendant 1 heure à 1000 °C et 1100 °C respectivement

II.7.3. Fusion de la poudre par le procédé "Oxygen Free"

Cette fusion est appliquée selon le procédé de fusion "Oxygen Free" avec différentes variantes. L'une d'elles consiste à appliquer une séparation réfractaire (ici une petite plaque en acier) entre la poudre métallique et le charbon du bois qui sert toujours d'obstacle à l'oxydation. Cette fusion est menée aux deux températures 700°C et 1000°C, et le refroidissement est effectué à l'air libre et la figure **II.6** illustre les résultats obtenus pour cette fusion.

Comme on peut le voir sur cette image, la poudre métallique grise argentée s'est transformée en poudre noire à la couleur du charbon du bois utilisé. Ce résultat inattendu ressemble au foisonnement du charbon dans la poudre. Une refusion ultérieure, même au chalumeau, n'a eu aucun effet sur cet amalgame. Nous avons tenté un nettoyage à l'eau distillée, à l'essence et au savon pour s'assurer de l'état de surface de cette poudre, et nous avons trouvé que sa couleur ne change. Ce résultat indique l'interaction de la poudre avec le milieu environnant pendant le traitement. Nous ne pouvons pas nous prononcer sur la nature de la poudre noire formée.

Avec ce procédé, on n'a pas abouti au résultat escompté, soit on l'a mal appliqué ou il ne convient pas à la poudre traitée.



Figure II. 6: Résultat de la fusion au procédé Oxygen free réalisée à 700 °C pendant 20 minutes

II.7.4. Fusion de la poudre dans un bain fondu

Dans cette opération on réalise un bain de fusion en faisant fondre à 1100 °C des coupons massifs d'aluminium. La poudre métallique sera ensuite versée dans ce bain pour subir la fusion. L'objectif de cette procédure est d'écourter le temps d'exposition de la poudre métallique à l'air et minimiser ainsi l'oxydation. Pendant la réalisation de cette fusion et durant le versement de la poudre, nous avons enregistré un jaillissement des flammes au moment du contact de la poudre avec le bain en fusion. Ce phénomène peut durer quelques secondes tant que la poudre métallique demeure en surface du bain et peut être étouffé en agitant le bain pour faciliter immersion des poudres.

Pour pouvoir effectuer la coulée de cette fusion, nous étions obligés d'enlever l'épaisse couche de scorie qui s'est formée en surface du liquide. Cette situation indique que la fusion effectuée ne semble pas réussie. En effet des traces d'agglomérats de couleur grise foncée se forment en surface et en volume de l'échantillon après solidification. Cet état rend difficile l'estimation de la quantité de poudre fondue. On estime donc, que cette technique ne donne pas la fusion recherchée.

Toutes ces opérations de fusion précédemment réalisées n'ont pas abouti à l'objectif souhaité qui est la fusion de la poudre d'aluminium. Cette poudre étant très fine s'oxyde très rapidement et entièrement au contact de l'air et de l'environnement actif, ce qui empêche sa fusion. Pour rendre possible la fusion de cette poudre, on doit lui offrir un environnement non actif ou sa

réactivité est minimisée. Comme les coupons massifs fondent, nous avons songé au compactage de la poudre.



Figure II. 7: Résultat de la fusion au procédé de la poudre dans un bain fondu réalisée à 1100 °C pendant 1 heure

II.7.5. Fusion de la poudre compactée (pastille)

Avant de procéder à la fusion, on effectue le compactage de la poudre ; cette opération est réalisée à l'aide d'une presse verticale ou les poudres sont compactées sous forme de pastilles (voir la figure II.8) appelées déchets massifs. Le compactage vise la densification par rapprochement des grains des poudres pour minimiser le contact avec l'oxygène et limiter ainsi la formation d'alumine. Cet essai a été réalisé dans le but de voir l'effet du compactage sur la fusion de la poudres métalliques de l'aluminium et de l'AGS.

Dans cette opération, des pastilles de mêmes tailles ont été traitées à 1000 °C pendant 20 minutes. Nous avons effectuée deux milieux, un traitement à l'air libre et un traitement au procédé Oxygen free avec le charbon actif du bois.

Tel qu'il apparaît sur la figure II.9, on constate le jaillissement, en surfaces de la pastille, des bulles de fusion de couleur gris claire. Ce résultat prouve que la fusion est produite en volume de la pastille et jailli en surface.

L'analyse micrographique des zones fondues, après solidification, illustrée par la figure II.10 et II.11 rappelle des microstructures correspondantes à un état cristallin (du matériau obtenu).

Cette opération a donc permis la fusion d'une partie de la poudre en volume de la pastille. En effet, la poudre en surface de la pastille réagit avec le milieu environnant (en particulier l'oxygène) et sert de bouclier qui empêche la diffusion des agents actifs vers la poudre du volume.

Par cette technique, nous estimons avoir enfin abouti à la fusion de la poudre d'aluminium et/ou de l'AGS.



Figure II. 8: La poudre compactée sous forme de pastille



Figure II. 9: Résultat de la fusion au procédé de la poudre compactée réalisée à 1000 °C pendant 20 minutes

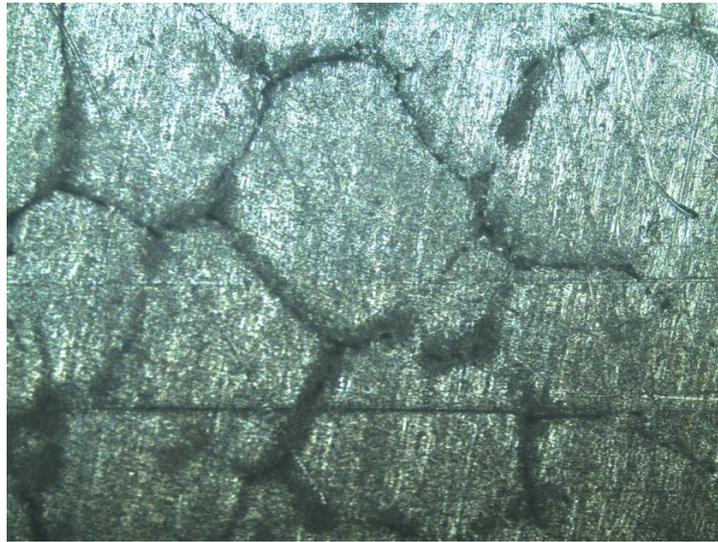


Figure II. 10: Micrographie optique d'une zone fondue après solidification (sans charbon) agrandissement X20

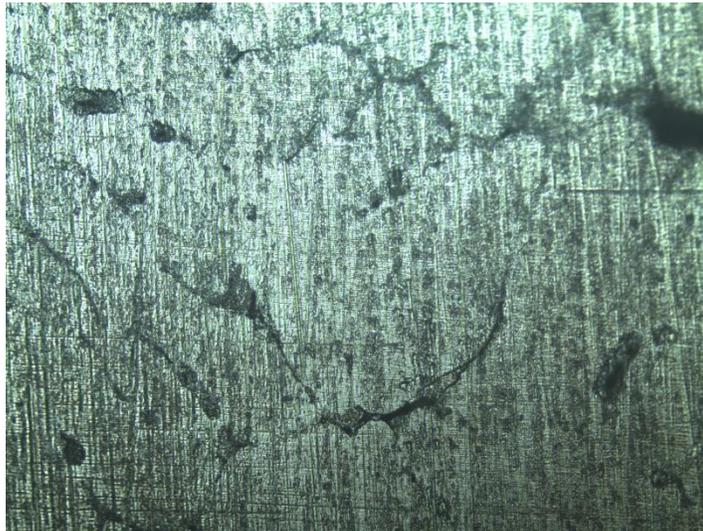


Figure II. 11: Micrographie optique d'une zone fondue après solidification (avec charbon) agrandissement X 20

II.8. Discussion

Selon le déroulement des expériences, on peut dire que la refusion de la poudre d'aluminium était difficile à réaliser. Durant toutes les manipes de refusion de l'aluminium à l'état de la poudre

libre, la fusion de la masse totale ne s'est pas produite. C'est plutôt une interaction de la poudre avec l'atmosphère avoisinante qui s'est produite. Il semble que la poudre était déjà consommée par la réaction produite avant même que la température de fusion soit atteinte. Dans le cas de la boue, l'évaporation du lubrifiant, avant la température de fusion, avait libéré le passage à l'air, à l'oxygène qui, en s'introduisant, oxydait la poudre ; tout s'est produit comme si la poudre (la boue) était déjà nettoyée. Le même scénario s'est produit durant la fusion en bain liquide, la poudre s'oxydait trop rapidement qu'elle restait flottante en surface et ne pénètre pas dans le bain. Même l'application du procédé Oxygen free n'a pas abouti à une fusion de la poudre d'aluminium, qui s'est noircie à la couleur du charbon.

Tous résultats convergent vers une réaction rapide de la poudre traitée avec le milieu ambiant. Effectivement, l'aluminium est connu comme étant très actif vis à vis l'oxygène ou autre substance oxydante, en vue de sa taille, la poudre traitée était entièrement ou majoritairement oxydée, avant même que sa température de fusion soit atteinte. C'est ainsi que fusion recherchée ne pouvait guère se produire. En effet, la formation d'une couche rigide en surface de l'objet qui maintient sa forme même pendant la fusion de l'aluminium massif confirme cette hypothèse. De ce constat qui nous est venue l'idée de consolider les grains de poudre en les compactant pour minimiser et/ou éviter l'oxydation et aboutir ainsi à une fusion de la poudre.

Dans le cas d'aluminium en état de poudre non consolidée (voir figure **II.12**), les grains de poudres étaient exposés à l'oxygène qui avait le chemin libre de circuler et de se renouveler, c'est ainsi que la poudre est oxydée avant même d'atteindre sa température de fusion. En revanche, dans le cas d'une poudre compactée, les chemins de circulation de l'oxygène sont bloqués (voir figure **II.13**) et seulement une petite quantité d'oxygène reste à l'intérieur piégée dans la porosité ne pouvait pas se renouveler. Cette quantité d'oxygène est vite consommée pendant le traitement, et la poudre du volume de la pastille avait la possibilité d'atteindre sa fusion sans s'oxyder.

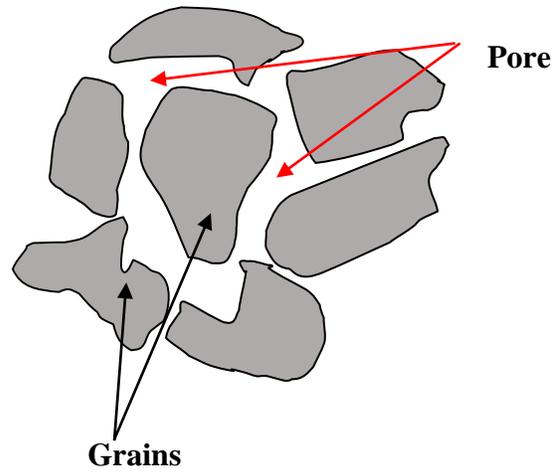


Figure II. 12: Poudre à l'état libre

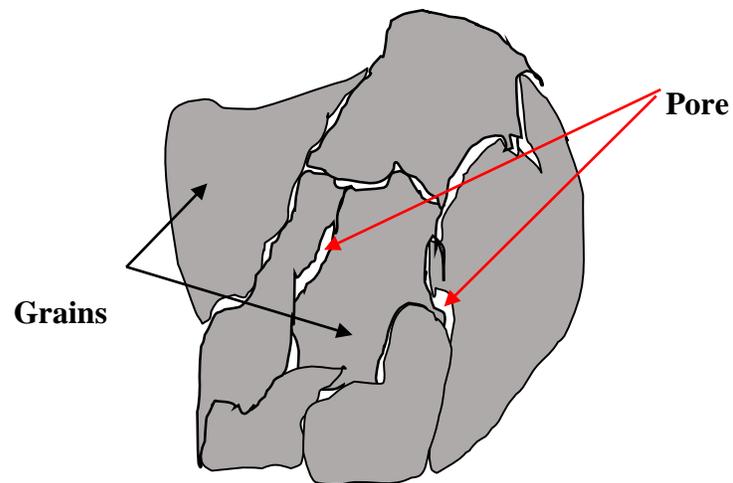
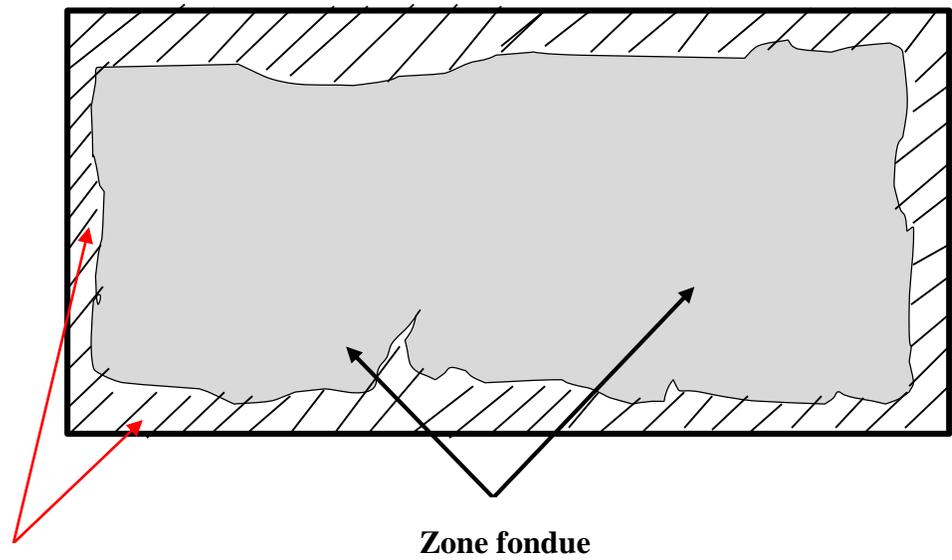


Figure II. 13: Poudre consolidée (Compactée)



**Zone non fondue couche
d'oxydes Al_2O_3 (alumine)**

Figure II.14 : Représentation schématique de la pastille fondue



Figure II.15 : Pastille fondue

Conclusion générale

Cette étude était consacrée la refusion de la poudre d'aluminium et les principaux résultats obtenus peuvent être résumés dans les points suivants :

- La poudre d'aluminium traitée était de petite voir fine qu'elle s'oxydait entièrement avant même d'atteindre sa température de fusion.
- Comme prédit, l'évaporation précoce du lubrifiant de la boue n'a pas permis de protéger la poudre de l'oxydation et aboutir ainsi à la fusion recherchée.
- Le procédé oxygen free n'a pas abouti au résultat escompté, soit il ne convient pas à la poudre d'aluminium soit on l'a mal appliqué.
- Le compactage réalise la consolidation des grains de poudre et bloque les canaux (chemins) de circulation et de régénération de l'air et permet ainsi à la poudre du volume de l'objet massif d'atteindre sa fusion sans s'oxyder.

Perspectives

Pour appuyer cette étude, nous souhaitons que dans des travaux ultérieurs :

- Examiné l'effet de la taille de la poudre sur la fusion.
- Revoir la réalisation technique du procédé oxygen free.

Résumé

Dans cette étude on a essayé de réaliser le recyclage des poudres d'aluminium et ses alliages par la fusion. Dans cette expérimentation nous avons effectué différentes méthodes de nettoyage et de fusion sur les poudres du bac de tréfilage.

Les fusions effectuées ; de la boue à l'air libre, de la poudre nettoyée à l'air libre, de la poudre nettoyée avec le procédé Oxygen Free et de la poudre nettoyée dans un bain fondu, n'ont pas abouti à la fusion recherchée. Ceci est liée directement à la taille des grains de poudre ; les grains étant fins sont consommés par l'air (oxydation presque complète du grain de poudre) avant même d'atteindre la température de fusion. Pour remédier à ce problème nous avons opté pour le compactage de la poudre. Le compactage consolide les grains de la poudre et diminue la distance entre eux et bloque ainsi la circulation d'air, ceci protège les grains de l'oxydation et les garde intacts jusqu'à la fusion totale.

Abstract

In this study, we tried to carry out the recycling of aluminum powders and its alloys by melting. In this experiment we carried out different methods of cleaning and melting on the powders of the drawing tank.

The melting carried out; sludge in the open air, powder cleaned in the open air, powder cleaned with Oxygen Free process and powder cleaned in a melt, did not result in the desired fusion. This is directly related to the size of the powder grains; the grains being fine are consumed by air (almost complete oxidation of the grain of powder) even before reaching the melting temperature. To remedy this problem we opted for compacting the powder. The compacting consolidates the grains of the powder and decreases the distance between them and thus blocks the flow of air, this protects the grains from oxidation and keeps them intact until the total melting.