

*République algérienne démocratique et populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*  
*Ecole nationale polytechnique*  
*Département de Métallurgie*

P0003/05A

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Thème

*ELABORATION ET CARACTERISATION  
D'UNE POUDRE D'ALUMINIUM OBTENUE  
PAR BROYAGE MECANIQUE DES COPEAUX  
D'USINAGE*

**Proposé et dirigé par :**  
Dr A. KASSER

**étudié par :**  
S. MOUCHACHE

*Promotion 2005*  
10, Avenue Pasteur, BP N° 182 El Harrach Alger

ملخص

إن الهدف الرئيسي من هذا البحث هو الوصول إلى تحديد العوامل التي تسمح بمراقبة طول و شكل و حالة سطح حبيبات الألومنيوم المحصل عليها عن طريق الطحن الميكانيكي للجذاذة. في هذا النطاق تم سحق جذاذات ذات أطوال مختلفة بواسطة طاحونة نقر تحت ظروف عملية متنوعة. الغبار المحصل عليه تم وضعه تحت مجهر ضوئي ثم مقارنة النتائج المحصل عليها مع غبار الفولاذ و القصدير.

#### Agzul:

Iswi umahil aggi ilhad s'usafer n w'adyen n'aluminium s w'abray amekanikal n'icelman n w'anar. Tamezzuyt aggi tezgad yef ugzu n w'abray icelman sumata. Timuttiwin in smmuzel figgini: akud, tawwayt d'ururud. Amadi n w'adyen idnufa, ibgned d'akken abray n'aluminium d'ushil. Ladya tiddi talemast n'iferdisen ufayit cwitt, acku l'aluminium yerdheb. Maca di tilawt, asnemhal ibgned d'akken illa w'abrar d'ameqran di tiddi. Ma talya, anadi aggi issentemed d'akken yella w'amhaz d'afaray, seg talya icelman yer talya tabusarit ueqqa l'qahwa, di tagara yer talya takurant, d' imecchimman. Dya seg unadi aggi nezmar adnini d'akken talya yaggi tunfilt taylant usabray ney. Susemgal yer tiddi, tazzyat n'tkumict tarqaqt l'aluminium tamqran m 'ara n'snemhal yer w'anfed lak d'bronze igmuzlan send deg yiwet tawtilt

#### Résumé :

Le but de ce travail consiste à élaborer une poudre d'aluminium par broyage mécanique des copeaux d'usinage. L'étude expérimentale a porté sur la compréhension de l'effet des variables de broyage sur les propriétés de la poudre obtenue. Les variables étudiées sont : le temps de broyage, la masse broyée et la vitesse de broyage. La caractérisation de la poudre ainsi élaborée a montré que l'aluminium est certes facilement pulvérisable en poudre, cependant que la taille moyenne des particules obtenues est légèrement grossière à cause de la ductilité manifeste de l'aluminium. En effet une étude comparative avec l'acier et le bronze réalisés sous les mêmes conditions, a montré une grande disparité concernant la taille. En revanche, concernant la morphologie, cette étude a confirmé l'évolution progressive dans le temps des particules, depuis une forme irrégulière de copeaux, vers une forme intermédiaire de grain à café, puis de beignet et finalement un mélange de particules quasi sphériques et de flocons (écailles). Ainsi cette étude a montré que cette forme particulière des particules est une constante de ce broyeur. Par opposition à la taille, la fraction fine de l'aluminium est substantiellement assez importante comparée à celle de l'acier et du bronze élaborés auparavant sous les mêmes conditions.

#### Abstract:

The aim of this work, is dealing with the production of an aluminium powder, by mechanical grinding of machining chips. The experimental study concerned with the comprehension of the effect of grinding variables on the properties of the powder obtained. The studied variables were: grinding time, the mass grinded and the grinding speed. The characterization of the obtained powder showed that aluminium is quite easily disintegrated into fine particles, whereas the mean size of particles is slightly coarser because of aluminium ductility. In fact the comparative study with steel and bronze realised under the same conditions, showed a great change and difference in terms of size. Nevertheless, concerning the morphology, this study confirmed the progressive evolution from an irregular shape of machining chips into an intermediate form of coffee beans, then to a cake like form and finely a mixture of quasi spherical and flake form particles. Thus, this study showed that this particular form of particles is a constant of this grinder. By opposition to the size, the mass of fine fraction of aluminium is substantially quite important compared to that of steel and bronze elaborated before under the same conditions.

#### Les mots clés:

Poudre, broyage, broyeur, mécanique, percussion, aluminium

## Remerciements

*En tant qu'étudiant en cinquième année métallurgie, le soutien moral est d'une importance capitale, pour pouvoir mener à terme la réalisation de mon projet de fin d'études. Pour cela, je tiens à remercier infiniment Mr A.Kasser pour tous les efforts qu'il a fourni pour le bon déroulement du projet, ainsi de m'avoir accordé son temps, son encadrement et ses conseils. Je tiens aussi à remercier Mr M.E. Djeghlal pour avoir accepté la présidence de mon jury, ainsi que Mr Daimallah et Mr Keddam pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Sans oublier Mr Saâda et Mr Hellal pour leur collaboration à la réalisation de ce projet. Je tiens d'autre part, à exprimer ma gratitude pour Mme la doyenne de l'université de mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour son aide octroyée durant la réalisation du résumé en langue Amazigh.*

*Mes sincères expressions de gratitude, et de reconnaissance pour tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# DÉDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents*

*Mon frère Tahar et mes sœurs Zahra, Ferroudja et la benjamine Malika*

*Mes proches*

*Mes amis Hanni, Maha, Moneer, Mohand Ouidir, Brahim sans oublier*

*Amou Zinou*

*Tous ceux qui comptent pour moi*

*S.A. Mouchache*

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

### CHAPITRE 1 : LE BROYAGE MECANIQUE

1. Intrduction .....	3
1. 2 Les principes du broyage .....	5
1. 2. 1 fracture fragile .....	5
1. 2. 2 le broyage des matériaux durs et fragiles.....	6
1. 2. 3 les facteurs majeurs contribuant a un broyage limite.....	6
1. 2. 4 le broyage des particules individuelles.....	7
1. 3 Paramètres de broyage et caractéristiques des poudres.....	8
1.3.1 relation de l'énergie.....	11
1. 3. 2 processus de broyage.....	12
1. 3. 2.1 micro-forgeage.....	12
1. 3. 2. 2 fracture.....	13
1. 3. 2. 3 agglomération.....	13
1. 3. 3 mécanisme de broyage.....	13
1. 3. 4 : environnement du broyage.....	14
1. 4 Influence du broyage sur les propriétés des poudres.....	14
1. 5 Le broyage a percussion.....	15

### CHAPITRE 2 : LES EQUIPEMENTS DE BROYAGE

2.1 Introduction.....	18
2.2 le broyeur a boulet Tumbler.....	18
2.2.1. Les paramètres de charge d'un broyeur a boulets.....	18
2.3. les broyeurs a vibration de boulets.....	19
2.3.1. le broyeur a tube vibratoire.....	19
2.3.2. le broyeur a vibration SWECO.....	21
2.4 les broyeurs a attrition.....	22
2.4.1 le mécanisme du broyeur a attrition.....	23
2.5 le processus d'impact Cold-Stream.....	24
2.6 le broyage a haute énergie.....	25
2.7 les broyeur tir « Hammer et Rod ».....	26

### CHAPITRE 3 : L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

1-Introduction.....	27
2- L'aluminium Industriel (Al ≥ 99,00 %).....	27
2-1 Influence Des Impuretés.....	27
3-Propriétés De L'aluminium.....	28
3-1-Propriétés Physiques.....	28
3-1-a) Propriétés Atomiques Et Cristallines.....	28
3-1-b) Densité.....	28
3-2-Propriétés Thermiques.....	29
3-3-Conductibilité électrique de l'aluminium.....	29
3-4-Propriétés mécaniques.....	29
4-Recuit de L'aluminium.....	30

4-1-Propriétés mécaniques à chaud.....	31
4-2-Propriétés mécaniques aux basses températures.....	31
5-Propriétés Chimiques.....	31
5-1-Réaction d'oxydation de l'aluminium.....	31
5-2-Action de l'eau sur l'aluminium.....	32
6- Alliages D'aluminium.....	32
6-1-Les alliages d'Aluminium.....	32
6-2-Les alliages de fonderie .....	33
6-2-1-proprietes des alliages d'aluminium de fonderie.....	33
6-3-structures des alliages d'Aluminium moulés.....	33
6-4-finesse de la structure de solidification.....	33
6-5-Les alliages aluminium silicium.....	34

### CHAPITRE 4 : PROCEDURE EXPERIMENTALE

1- Introduction .....	35
2- Fabrication des copeaux .....	35
3- Caractérisation des copeaux .....	35
4-Description du broyeur .....	36
5- Processus de broyage .....	36
6- Description des tamis.....	36
7 -Description de la tamiseuse.....	36
8- Description de la balance.....	36

### CHAPITRE 5 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.1 Introduction.....	38
5.2 But du travail.....	38
5.3 Elaboration de la poudre.....	38
5.3.1 Influence du temps de broyage sur la taille moyenne de la poudre.....	39
5.3.2 Influence de la vitesse de broyage sur la taille moyenne de la poudre.....	41
5.3.3 Influence de la charge initiale sur la taille moyenne de la poudre.....	42
5.3.4 Influence des variables de broyage sur les courbes de distribution de taille.....	44
5.4 Influence du temps de broyage sur la taille moyenne des particules .....	47
5.5 : Influence du temps de broyage sur la fraction fine .....	48
5.6 :Influence de la vitesse de broyage sur la fraction fine.....	49
5.7 : Influence de la charge broyée sur la fraction fine.....	50
5.8 : Influence de charge broyée sur la taille moyenne des particules de poudre.....	51
5.9 : Influence de la vitesse de broyage sur la taille moyenne des particules de poudre.....	52
5.10 : Comparaison de l'aluminium avec le bronze et l'acier élaborées par le même procédé....	53
5.10.1. Comparaison de la taille moyenne de la poudre en fonction du temps.....	53
5.10.2. Comparaison de la taille moyenne des poudres après un broyage de 8 heures pour les trois métaux.....	54
5.10.3 : Comparaison entre les fractions fines obtenues pour l'aluminium, le bronze et l'acier .....	56

## CHAPITRE 6 : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

1. Introduction.....	57
2. Influence du temps de broyage.....	57
3. Influence de la vitesse de broyage.....	59
4. influence de la charge broyée.....	60
5. Evolution de la fraction fine.....	60
5.1 Influence du temps de broyage sur la fraction fine.....	60
5.2 Influence de la masse initiale des copeaux.....	61
5.3 Influence de la vitesse sur la fraction fine.....	61
6. Comparaison des résultats obtenus avec le bronze et l'acier.....	61
7. Influence des variables de broyage sur la morphologie des particules de poudre.....	62
7.1 Morphologie du copeau initial.....	62
7.2 Evolution morphologique des particules de poudre pendant le broyage.....	63
7.3 Agglomération pendant le broyage.....	65
7.4 La morphologie de la fraction fine.....	67
8. Equation paramétrique de simulation.....	69
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>70</b>
<b>PERSPECTIVES.....</b>	<b>71</b>

**INTRODUCTION GENERALE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

La métallurgie des poudres est aussi ancienne que l'art des potiers et des céramistes. Cependant, ce qui n'était que techniques ancestrales purement empiriques s'est transformé en une discipline scientifique dans les années 1930, dès qu'on a commencé à comprendre les phénomènes observés. Cette compréhension est d'autant plus nécessaire que les techniques relevant de la métallurgie des poudres présentent un grand intérêt pour certaines fabrications industrielles : préparation de céramiques et de métaux réfractaires, de pièces mécaniques structurales, de coussinets, de filtres, de barrières de diffusion, de combustibles nucléaires.

La métallurgie des poudres diffère de la plupart des techniques métallurgiques en ce qu'elle n'implique jamais la fusion totale du matériau mis en œuvre. Elle est employée soit parce qu'elle est un moyen commode de produire certains métaux ou alliages dotés de propriétés physiques ou mécaniques particulières (élaboration de métaux réfractaires, tel le tungstène, d'alliages ou de pseudo-alliages de deux matériaux non miscibles à l'état liquide, comme le cuivre et le graphite, ou encore de pièces poreuses dans toute leur masse), soit parce qu'elle est une méthode de fabrication relativement économique quand un grand nombre de petites pièces mécaniques identiques est requis. Elle permet en outre d'obtenir directement des pièces à la forme voulue qui nécessitent peu ou pas de finition. Différentes techniques ont été mises en œuvre et développées pour la production des poudres métalliques dont on peut citer :

1. Les procédés chimiques basés sur la précipitation du métal à partir des solutions des sulfates métalliques ( $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,...) ou par précipitation en solution ammoniacale d'Hydroxyde, lesquels par calcination à l'air sont convertis en oxyde anhydres ( $\text{ZrO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
2. Les procédés électrolytiques relevant de l'électrolyse des solutions aqueuses et convenant particulièrement aux métaux purs tels que Cu, Ag, Au, Fe, Zn....etc.
3. Les procédés physiques, appelés souvent atomisation, consistent en la désintégration d'un écoulement vertical de métal liquide à partir d'un bain métallique. Cette pulvérisation est réalisée grâce à un fluide atomiseur sous haute pression, qui peut être un gaz inerte (azote, argon) ; de l'air ou d'un liquide (eau, huile). Les particules obtenues sont de forme sphériques dans le cas d'une atomisation à gaz, et de forme irrégulière dans le cas d'une atomisation à l'eau, et leurs tailles varient entre 10 et 500  $\mu\text{m}$ .

4. La méthode mécanique qui se base essentiellement sur la désintégration par choc et abrasion en utilisant des broyeurs à mâchoires, à marteaux à boulets...etc. Cette méthode est appliquée souvent dans les cas où les matériaux à réduire en poudre sont durs et fragiles comme le Mn, Sb, Bi, Fe, Al,...mais aussi dans le cas des matériaux ductiles préalablement fragilisés par une diffusion d'Hydrogène au niveau des joint de grains.

Le sujet de recherche présenté dans cette thèse, porte justement sur cette dernière méthode citée au dessus. En effet des copeaux d'usinages d'aluminium sont utilisés comme matière première pour la production d'une poudre d'aluminium. Ces copeaux produits par tournage sont broyés à l'état brut sans aucun traitement préalable en utilisant un broyeur à lames à percussion conçu et réalisé par Ourahmoun. Durant ce travail, les principales variables de broyage étudiées sont : le temps de broyage, la vitesse de broyage et la masse broyée. Les résultats obtenus ont montrés que la taille des particules de poudre produite est fortement dépendante de ces variables, tandis que la forme sphérique obtenue des particules est une caractéristique établie du broyeur utilisée. Enfin, une étude comparative de cette investigation avec des travaux réalisés auparavant sur le bronze et l'acier mi-dur est présentée. Cette comparaison a révélé des comportements vis-à-vis de l'action de broyage, conformes aux propriétés physiques et chimiques des matériaux broyés.

## CHAPITRE 1

### LE BROYAGE MECANIQUE

#### 1.1 INTRODUCTION :

Le broyage mécanique des copeaux d'usinage durs, ou ductiles, a une grande importance industrielle et économique dans l'industrie de la métallurgie des poudres. La pulvérisation mécanique est la méthode la plus employée dans la production des poudres à partir des métaux durs et des oxydes. Le broyage des gâteaux spongieux obtenus par la réduction des oxydes, ainsi que les agglomérés d'origine électrolytique, est le processus le plus commun de broyage. Dans ce but, des broyeurs divers sont employés pour transformer des particules grossières en particules fines.

La pulvérisation mécanique est limitée aux métaux relativement durs et fragiles, comme le tungstène. Quelques métaux réactifs comme le béryllium et les hydrures des métaux ; sont employés pour la production des flocons de métaux et les matériaux chimiquement fragilisés.

Le regain d'intérêt aux poudres de métaux avec des tailles de particules plus fines que celles des particules de poudre produites par atomisation, a réactivé l'intérêt porté au broyage mécanique qui jouissait d'une faible attention auparavant. Cependant, des recherches discrètes ont été menées par des entreprises industrielles dans ce domaine, ce qui a permis la mise en œuvre d'équipements sophistiqués pour la production des poudres par cette technique [1]. Les objectifs du broyage incluent :

- La réduction de taille des particules.
- Le changement de forme par la déformation et l'écaillage.
- L'agglomération à l'état solide (alliage mécanique).
- L'élaboration d'alliages métalliques après le mélange d'éléments divers.
- La modification de certaines propriétés physiques et mécaniques, telles que la densité, la coulabilité, la dureté... etc.
- Le mélange de deux ou plusieurs matériaux en phases mixées.
- Le mélange à l'état solide (alliage incomplet).

Dans la plus part des cas, l'objectif du broyage est la réduction de la taille des particules. L'opération de broyage implique souvent le déroulement simultané des opérations suivantes : la déformation plastique, la fracture, et l'agglomération par soudage à froid des particules. Le broyage peut produire aussi des transformations polymorphes [1], comme c'est le cas pour les oxydes de plomb, et les aciers inoxydables [2]. L'effet spécifique qu'a le broyage sur les poudres dépend de leurs propriétés physiques et chimiques, de l'environnement (liquide, gazeux ou vide) dans lequel les opérations sont effectuées, et les conditions de broyage. Le choix des processus de broyage est basé sur des résultats désirés de l'opération de broyage, le comportement de la poudre dans les conditions de broyage (si elles sont connues), les caractéristiques de la poudre et les propriétés physiques et mécaniques du matériau. Durant le broyage, quatre types d'effort agissent sur le matériau : la percussion, l'attrition, le cisaillement et la compression.

1. La percussion est l'écrasement instantané d'un objet par un autre. Les deux objets peuvent être en mouvements opposés, ou que l'un soit mobile et l'autre fixe.
2. L'attrition est la production des débris d'usure ou de particules par l'action de frottement de deux corps l'un sur l'autre. Ce type d'effort de broyage est préférentiel dans le cas du broyage des matériaux friables, et qui montrent une abrasivité minimale.
3. Le cisaillement contribue à fracturer par cassure les grosses particules en de petits morceaux individuels avec un minimum de finesse.
4. Finalement, la compression qui est l'application lente des forces de compression sur un corps, est souvent associée à l'action des mâchoires du broyeur sur la matière et au concassage de grands agglomérés de matériaux non ductiles.

La conception et l'amélioration des processus de broyage ont été basées sur des données empiriques et semi empiriques. L'avancement a été perçu dans la nature de la fracture fragile des matériaux relativement homogènes. La fracture se produit dans des matériaux durs et fragiles. Cela s'accompagne souvent avec une agglomération par soudage à froid et une déformation plastique minimale des particules. La déformation, la fracture et le soudage à froid résultent de l'action de pulvérisation ou de mélange des matériaux hétérogènes, et se produisent à des degrés différents sur les matériaux durs ou ductiles.

## 1.2 LES PRINCIPES DU BROUAGE :

### 1.2.1 FRACTURE FRAGILE

La théorie énoncée par GRIFFITH [3], assume que tous matériau fragile contient des fissures bien dispersées, qui engendrent sa fracture. La contrainte  $\sigma_c$  à laquelle la fissure se propage, dépend de sa taille. La forme générale de l'équation de la fracture pour les modes de chargement qui mènent à des fissures catastrophiques est [3].

$$\sigma_c = A \left( \frac{\gamma E}{c(1-\mu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

Où :

A : Constante numérique dépendant de la géométrie de la fissure, de sa position, du mode de chargement et des dimensions des particules.

c : La taille de la fissure.

E : Le module d'élasticité.

$\mu$  : Le coefficient de Poisson.

$\gamma$  : L'énergie de surface du matériau utilisé.

Ainsi, la contrainte mesurée dépend de la taille de la fissure, des propriétés élastiques et de l'énergie de surface. Pour les matériaux fragiles,  $\gamma$  varie entre  $10^3$  et  $10^4$  erg/cm<sup>2</sup>.

La contrainte  $\sigma$ , pour la fracture d'une particule peut être représentée par [3].

$$\sigma = \left( \frac{2Er}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

Où :

L : la longueur de la fissure

r : rayon de la fissure au point d'inflexion.

Quand l'effort au bout de la fissure est égale à la force de cohésion entre les atomes, toute nouvelle énergie de surface est fournie par l'effort lui-même à partir de l'énergie de déformation élastique et correspond rudement au modèle de GRIFFITH.

Trois type de défauts (faciaux en volume ou en arête) ont été découvert par Gilvarry [4] en respectant la position dans la surface ou à l'intérieur des particules. La fracture initiale en surface sur une particule, commence dans les défauts de surface de la particule originale. Cependant, l'insuffisance des défauts en surface explique le grand nombre de fragments formés dans les fractures fragiles. Lorsque les défauts internes sont activés, deux surfaces en opposition sont créées. Chacune d'elle contient des défauts inter-coupés par la propagation des fractures à partir des défauts en volume. De même, les arêtes formées par l'intersection des fractures en surface contiennent des défauts linéairement distribués le long de cette arête. La conjugaison totale de ses défauts en activation génèrent de nouvelles fractures et donc des subdivisions à l'infini.

Selon GILVARRY, les trois types de défauts sont distribués indépendamment l'un de l'autre, comme conséquence d'une orientation hasardeuse des fractures en surface et la contrainte de fracture. Les défauts activés sont distribués indépendamment d'une quelconque contrainte produisant des fractures. Plus précisément, la position d'un défaut à l'intérieur d'un domaine est indépendante de la position des autres défauts. Le nombre de défauts contenus dans un sous-domaine, est indépendant du nombre de défauts contenus dans un autre sous-domaine. Les fractures sont initiées par un système de contrainte extérieure qui est dégagé avec la propagation des premiers défauts faciaux. Après la fracture initiale, les défauts sont activés par les ondes de contraintes qui sont générées par l'application et le retraitement des contraintes externes. D'après GILVARRY, la distribution des défauts a une forme parabolique. Durant une action de broyage, les conditions de réalisation d'une fracture sont satisfaites occasionnellement. La valeur du temps et de l'énergie requise pour produire une fracture varient avec le processus de broyage et son environnement. Comme la taille des particules décroît, la concentration et la taille des défauts diminuent à un point où les défauts en arêtes ne restent pas plus longtemps dans les particules activées par les contraintes [4]. En ce point, la fracture s'arrête.

### 1. 2. 2 LE BROYAGE DES MATERIAUX DURS ET FRAGILES

Durant le broyage, la majeure partie de l'énergie emmagasinée est dépensée dans des processus internes variés qui ne contribuent pas à la cassure de la particule. Comme le broyage se poursuit dans la région ultra fine, les modes de fracture varient, et les conditions qui étaient insignifiantes lorsque les particules étaient relativement grosses deviennent graduellement des facteurs de contrôle.

Eventuellement, les processus de broyages peuvent atteindre des limites efficaces, où les effets physiques et chimiques associés aux surfaces, arêtes et aux coins se multiplient jusqu'à inhiber la pulvérisation. La longueur de l'arête par unité de volume varie directement avec le carré de l'aire de la surface spécifique. Ainsi, la probabilité pour qu'une particule individuelle soit sous état de contrainte jusqu'à la cassure devient de plus en plus petite. Si la particule est déformée plastiquement, la fracture sera difficile à provoquer, et la probabilité pour qu'une contrainte agisse est réduite d'avantage. Comme la taille des fragments décroît, la tendance d'agglomération augmente. Les particules deviennent d'autant plus fines et s'approchent de leur limite de finesse pendant que le broyage continue et l'énergie maximum est dépensée [4].

### 1. 2. 3 LES FACTEURS MAJEURS CONTRIBUANT A UN BROYAGE LIMITE SONT [5] :

- L'augmentation de la résistance à la fracture.
- L'augmentation de la cohésion entre les particules et la diminution de la taille des particules causant l'agglomération.
- L'augmentation excessive entre les surfaces d'impact qui se trouvent minimisées lorsque le diamètre des boulets et leurs rayons de courbure décroissent.
- Le revêtement du milieu broyant par de fines particules qui couvrent le micro-lit de l'impact.
- La rugosité de surface du milieu broyant.
- Le pontage de grosses particules pour la protection des plus petites dans le micro-lit
- L'augmentation de la viscosité apparente lorsque la taille des particules diminue.

- La diminution de la friction interne du film avec diminution de la taille des particules, ainsi que la réduction de production de fines particules par le mécanisme d'usure et aussi la diminution de la probabilité d'impaction des particules.

Généralement, quand la pulvérisation agit durant un temps prolongé, la contrainte moyenne nécessaire pour la fracture des particules augmente, pendant que les contraintes locales requises pour initier la fracture, diminuent.

#### 1.2.4 LE BROYAGE DES PARTICULES INDIVIDUELLES

Les poudres sont caractérisées selon leur taille des particules, leur distribution de tailles dans une masse donnée, leur forme ainsi que leur état de surface des particules individuelles ou globales. Ces caractéristiques déterminent la coulabilité, la densité apparente, la couleur, la frittabilité, la compressibilité et les propriétés des produits frittés. Les figures 1.1 montrent certaines de ces propriétés.

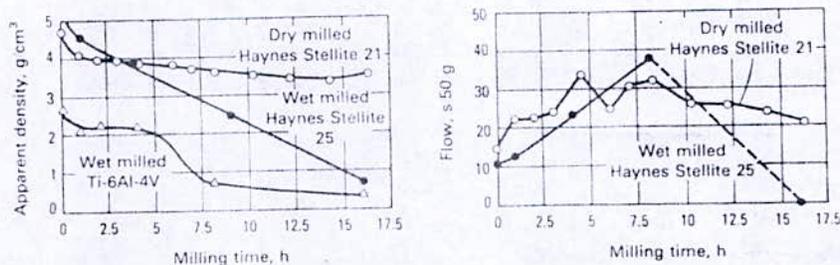


Figure 1.1 : Effet du temps de broyage à vibration sur la densité apparente et le champs de coulabilité d'une poudre à base de cobalt et de titane [5]

Les caractéristiques des particules déterminent la manière dont elles sont déformées ou fracturées et leur résistance à la cassure. La fracture mécanique des particules individuelles doit être prise en considération pour la sélection de l'équipement de broyage et ses conditions. La figure 1.2 illustre l'écrasement des particules individuelles entre les boulets pendant le broyage dans un broyeur à boulets. Cette condition est rencontrée dans le broyage des particules relativement grosses ou d'une fraction de poudre. Cela peut se rencontrer également dans le cas des gros granulés des matériaux céramiques, des métaux durs, ou des grosses particules de poudres de métaux ductiles atomisées sous des conditions défavorables et qui nécessitent donc un affinement ultérieur par broyage. Dans tout ces cas là, l'impacte de particules individuelles est dominant. Dans le cas des céramiques et des métaux durs, les grosses particules fragiles sont rapidement réduites en poudre fine et ultra fine. Le broyage des particules individuelles fragiles est montré dans la figure 1.2.a. Durant le broyage des métaux ductiles montrés en figure 1.2.b, les particules individuelles ne se fracturent pas, mais se déforment en impliquant un changement de forme avec un changement de masse négligeable.

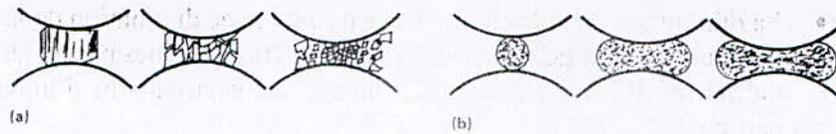


Figure 1.2 : Effet de l'impact sur les matériaux fragiles et ductiles [5]

Les grosses particules individuelles des matériaux fragiles se désintègrent en fragment, pendant que celles des matériaux ductiles se déforment en galette pour prendre ensuite une forme de flocons comme le montre la figure 1.3.

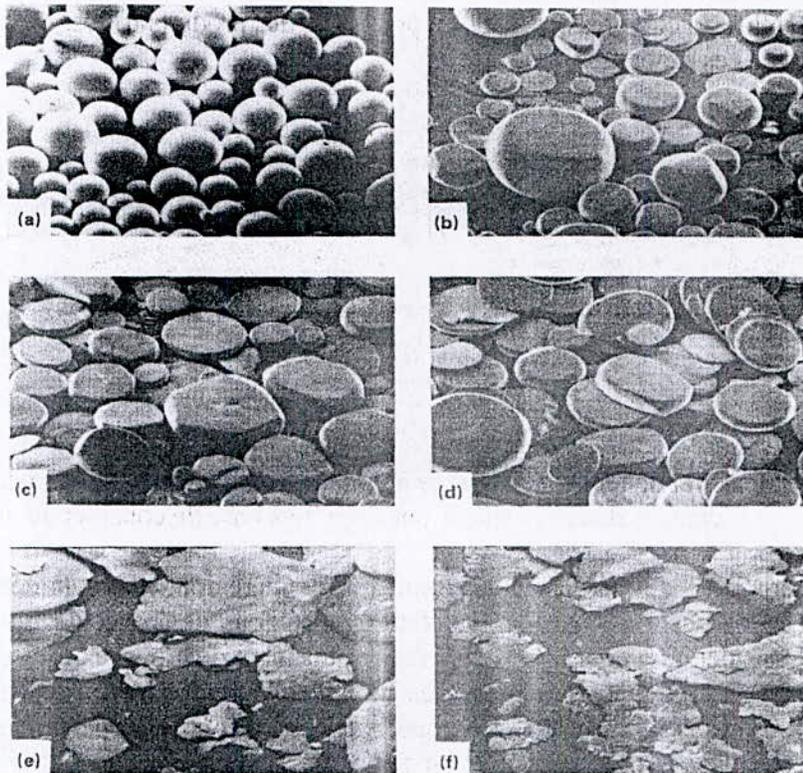


Figure 1.3 : Effet du temps de broyage sur le changement de forme des particules sphériques d'un alliage de Ti-6Al-4V [5]

### 1.3 PARAMETRES DE BROYAGE ET CARACTERISTIQUES DES POUDRES

Les éléments de broyage dans un broyeur à boulets se déplacent à différentes vitesses. Par conséquent, les forces de collision, la direction et l'énergie cinétique entre deux ou plusieurs éléments varient considérablement à l'intérieur de la charge broyante. L'usure par friction ou les forces de frottement agissent sur les particules de même que l'énergie de collision. Ces forces sont dérivées des mouvements rotatoires des boulets et le mouvement des particules à l'intérieur du broyeur ainsi que les zones de contact des boulets en collision. Les forces de friction exercent une action d'usure entre particules en contact l'une sur

l'autre, produisant des débris d'usure. Les forces d'impact dans les applications du broyage réduisent effectivement la taille des particules entraînant la fraction des particules grossières des matériaux durs et fragiles.

Les forces d'impact sont désirables pour les processus de déformation des poudres métalliques. La figure 1.4 montre le changement de largeur du flocon de poudre de fer en fonction du temps de broyage à vibration de boulets. L'attrition est la plus effective des forces, lors du broyage fin des matériaux à la fois durs et ductiles, et des alliages mécaniques. Pour la plupart des broyeurs à boulets, les particules sont soumises à la fois à l'attrition et à l'impact. Lorsque les forces sont hautement énergétiques, on peut avoir des soudures froides entre les particules de poudre et les parois de la chambre du broyeur. La force d'impact est directement proportionnelle à la masse du milieu broyant. Par conséquent, le nombre de processus et de forces qui agissent sur les particules est une fonction directe du diamètre effectif et de la masse des corps broyants.

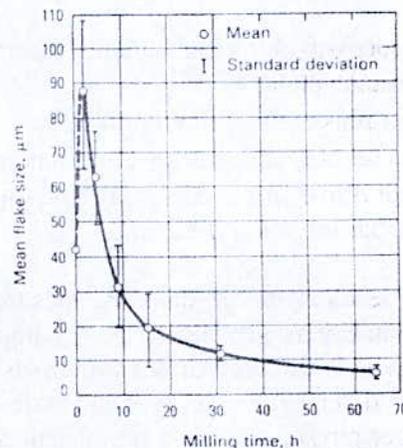


Figure 1.4 : Relation entre la taille des flocons et le temps de broyage pour un fer électrolytique broyé dans le broyeur à vibration de boulets Megapact [6].

Les valeurs réelles des forces de collision diffèrent largement des valeurs théoriques à cause du mouvement complexe du milieu et la variation de vitesse, de la longueur du chemin et des trajectoires des corps individuels de broyage. La viscosité du fluide influe aussi sur le taux de collision dans le cas d'un broyage humide. Généralement la taille et la densité du milieu broyant sont déterminées par la déformation, et la résistance à la fracture est uniquement un critère de sélection.

Les milieux broyant, gros et dense, sont utilisés pour des particules plus grosses et plus robustes, alors que les milieux de diamètres plus petits sont utilisés pour le broyage fin. Par exemple, les baguettes de céramique ayant un diamètre de 16mm et une densité de 3.9g/cm<sup>3</sup> peuvent être utilisées pour réduire la grosseur des flocons minces des métaux vers des flocons très fins. Les éléments de broyage de petite taille ne peuvent effectivement être utilisés dans le broyage conventionnel à boulets à cause de la faiblesse de leur force d'impact. Pour le broyage fin des matériaux durs, des milieux broyants en carbures de tungstène sont recommandés.

Souvent, un compromis doit être pris pour la sélection de la taille des boulets et le matériau broyé. Bien que les boulets en carbures de tungstène soient économiques pour un broyage expérimental à petite échelle, ou pour broyer des matériaux chers, le coût peut être prohibitif pour quelques opérations de broyage à grande échelle. Certains milieux, comme les boulets en acier inoxydable, ne peuvent pas être disponibles en grande quantité pour certaines tailles. Ainsi, les conditions optimales du broyage ne peuvent pas être satisfaites dans tout les cas.

La surface et la taille des particules des matériaux non métalliques broyés, changent continuellement. La surface spécifique du produit broyé augmente lorsque la taille des particules diminue. Cependant, avec les métaux, deux facteurs additionnels doivent être pris en considération en addition à la pulvérisation. Les particules du métal peuvent s'agglomérer par soudure à froid durant l'impact. Ainsi il y aura une réduction de la surface spécifique de la poudre métallique, et un changement de forme à cause de la ductilité et l'aptitude à la déformation et à la soudure à froid.

Ainsi, selon le processus dominant durant l'opération de broyage (fracture, soudure, ou micro forgeage) la particule peut :

- Devenir plus petite durant la fracture,
- Augmenter de taille grâce à l'agglomération par soudure,
- Changer d'une forme équiaxiale sphérique à une forme de disque ou de flocon, par un micro forgeage.

Pour les métaux, le changement dans les mesures de la surface et de la taille des particules ne fournit pas un critère significatif pour comparer les effets du changement dans les paramètres du processus, la dominance des processus et les équipements de broyage. Un critère plus utilisé pour déterminer le processus de broyage est celui qui reflète les changements structuraux et physiques qui se produisent dans le métal et qui est sensible aux changements des paramètres des processus. La mesure de la micro-dureté des particules individuelles, assez larges pour contenir l'empreinte de la plus petite pyramide de dureté à tête en diamant, donne une mesure convenable de l'effet du broyage sur les poudres métalliques. Parce que la dureté est la mesure d'un travail à froid et des défauts internes produits par la déformation, elle renseigne mieux sur les efforts subies par les particules durant le broyage. Comme le montre la figure 1.5, la mesure de la dureté est significative jusqu'à un temps de broyage approprié à un maximum de travail à froid produit.

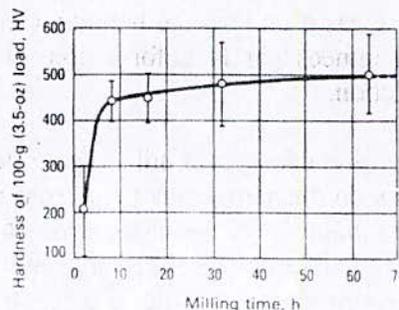


Figure 1.5 : Effet du temps de broyage sur la micro dureté du nickel 123 [6]

Par ailleurs, l'espacement des raies de diffraction aux rayons X est sensible à l'importance du travail à froid et à l'affinement de la structure cristalline qui résulte d'un travail à froid, poursuivi au-delà du niveau de saturation. La variation des taux de déformation des poudres produites par un ensemble de paramètre de broyage donné, est illustrée au moyen de la relation entre l'écartement des raies de diffraction et les temps de broyage, Comme le montre la figure 1.6

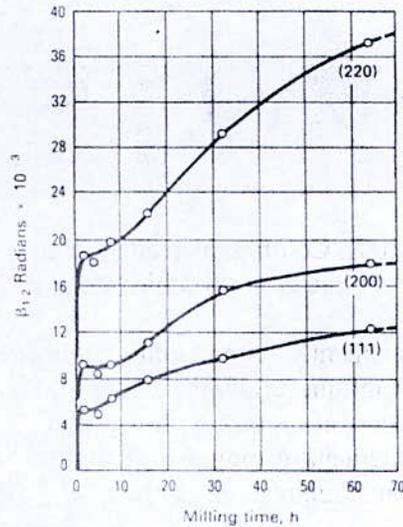


Figure 1.6 : Relation entre l'espacement des raies de diffraction et le temps de broyage à vibration pour une poudre de nickel 123 [6]

### 1.3.1 RELATION DE L'ENERGIE

Lorsque le métal est déformé plastiquement par un travail à froid, la majeure partie de l'énergie mécanique du processus de déformation est transformée en chaleur, cependant qu'une petite quantité (5% environ) est emmagasinée dans le métal ce qui hausse son énergie interne. L'énergie associée à la tension du réseau ou au travail à froid, est minimale pour les particules dures et fragiles, mais elle peut être grande pour les matériaux ductiles. L'énergie dépensée pour surmonter la friction entre les particules est transformée en chaleur, et accomplit un travail inutile dans le broyage. Si la température de la poudre monte au-delà d'un certain point, les particules du métal ayant subies un écrouissage par travail à froid, peuvent subir une recristallisation. La chaleur est générée par la déformation plastique des particules, la déformation élastique des outils de broyage ainsi que du frottement de la poudre contre les parois de la chambre de broyage. La figure 1.7 illustre les courbes de températures typiques contre le temps de broyage pour une poudre d'un alliage Fe-27Ni-16Cr broyé à sec dans un broyeur à vibration [7].

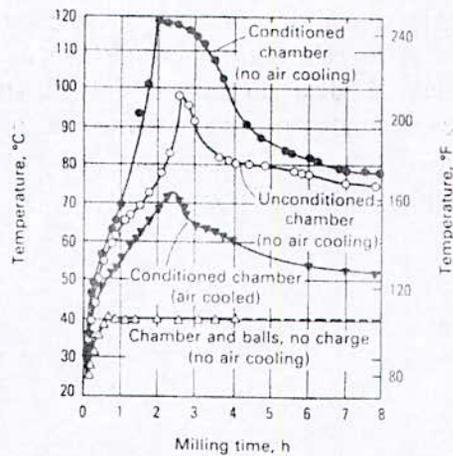


Figure 1.7 : Courbes de chauffage pour une chambre de broyage de 280 cm<sup>3</sup> en acier inoxydable durant un broyage à vibration du fe-27Ni-16Cr [7]

Généralement la température augmente durant un travail à froid rigoureux, et chute brusquement avant que ce dernier n'atteigne son niveau de saturation, puis elle décroît lentement après l'extension du temps de broyage. Les chambres de broyage dites « water-jacketed » sont normalement recommandées pour les gros broyeurs à haute attrition et à haute énergie de vibration qui atteignent des températures supérieures à 200°C.

### 1.3.2 PROCESSUS DE BROYAGE

Les changements morphologiques des particules de poudres survenant durant le broyage sont obtenus par les processus suivants :

Processus	Symboles de désignation
Micro-forgeage	M
Fracture	F
Agglomération	A
Soudure (liaison atomique)	A <sub>w</sub>
Imbrication	A <sub>m</sub>
Auto-adhésion	A <sub>a</sub>
Dés agglomération	D

#### 1.3.2.1 MICRO-FORGEAGE

Le processus initial prédominant durant le broyage, est la compression des particules des métaux ductiles au moyen de l'impact par le milieu broyant. Les particules individuelles ou en groupe sont percutées à plusieurs reprises par le milieu broyant de telle sorte qu'elles se déforment avec un petit changement de masse ou nul.

### 1. 3. 2. 2 FRACTURE

Après une période de broyage, les particules individuelles se déforment à un point, où commencent à s'initier des fissures qui se propagent pour finalement fracturer les particules. La présence des fissures, des imperfections et des inclusions dans les particules, facilite la fracture. Les particules de formes irrégulières ou spongieuses, contiennent des fissures et des pores qui facilitent la compression, la rupture par la fatigue et la fragmentation. Par comparaison, ces défauts ne sont pas présents en quantités suffisantes dans les particules sphéroïdales lisses et relativement non poreuses produites par atomisation à gaz. Par conséquent, ces dernières seront difficilement broyables mécaniquement. Quelques métaux friables comme l'antimoine, le bismuth, le manganèse, le chrome et certains alliages intermétalliques fragiles, tels que les systèmes Cu-Al, Al-Mg, Cu-Sn, Ni-Fe, Ni-Zr, et P-Cu peuvent être facilement broyés en poudre.

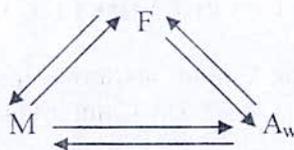
### 1. 3. 2. 3 AGGLOMERATION :

L'agglomération des particules peut se faire par soudure à froid, par imbrication mécanique des surfaces spongieuses ou rugueuses ou par auto cohésion. L'auto cohésion est l'interaction moléculaire des particules entre elles. Elle est caractérisée par les forces de van-Deer-Waals. La désagglomération est le processus qui casse les agglomérés formés par auto-cohésion, sans désintégrer les particules individuelles de poudre.

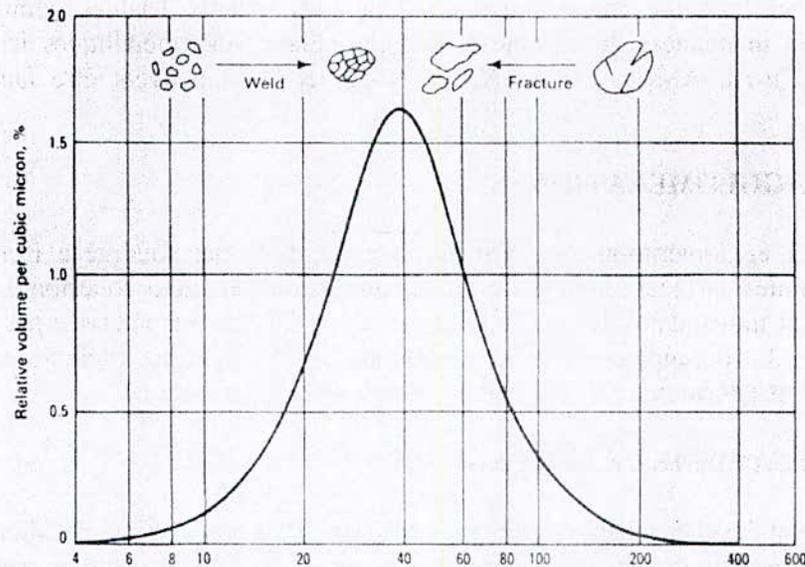
### 1. 3. 3 MECANISME DE BROYAGE :

Un des mécanismes de broyage consiste en un stade initial de Micro-forgeage, durant lequel les particules sont déformées en l'absence de l'agglomération par soudure et de la fracture. Eventuellement les particules deviennent tellement déformées et écrouies puis fragilisées par le travail à froid, qu'elles entrent en second stade, durant lequel elles se fracturent par le mécanisme de rupture par fatigue et/ou par la fragmentation de flocons fragiles. Les fragments générés par ce mécanisme peuvent continuer à diminuer en taille en l'absence des grandes forces d'agglomération, par alternance du micro forgeage et de la fracture. Lorsque la fracture domine et le rôle du micro forgeage est négligeable en l'absence de l'agglomération par soudure, les flocons continuent à devenir plus petit tant que l'interaction moléculaire agit. Comme les particules (particulièrement les flocons) deviennent encore plus fines, le couplage des forces tend à être plus important, et les agglomérés deviennent plus gros

Eventuellement, les forces de broyage qui désagglomèrent les particules, s'équilibrent avec les forces couplées présentes, ce qui donne un aggloméré de taille équilibrée. Lorsque la soudure à froid agit entre les particules, le processus de fracture (F) de micro forgeage (M) et d'agglomération par soudure ( $A_w$ ), agit en boucle fermée, comme le montre le schéma ci-dessous :



Après une période de temps, la soudure à froid et la fracture atteignent un état d'équilibre stable. La taille moyenne des particules obtenue dans ce stade, dépend de la facilité relative avec laquelle l'aggloméré peut être formé par soudure, par la fatigue et la force de rupture des particules composites, et par la résistance des particules à la déformation. La distribution de taille des particules est étroite, parce que les particules de taille plus grosses que la moyenne sont réduites en taille avec un même rapport que les fragments plus petits que la moyenne. Les agglomérés se forment et s'agrandissent dans un tas de petites particules et de débris produits par attrition. Cette distribution est montrée dans la figure 1.8 ci-dessous.



#### 1. 3. 4 : ENVIRONNEMENT DU BROYAGE

Des agents actifs à la surface et des lubrifiants sont utilisés pour neutraliser les forces de soudure et inhiber l'agglomération. Ces agents actifs qui sont absorbés par la surface des particules empêchent le soudage et diminuent la tension de surface du matériau solide. Du fait que l'énergie requise pour le broyage soit égale au produit des nouvelles surfaces générées que multiplie la tension de surface, une réduction de la tension de surface résulte de l'utilisation d'un temps de broyage plus courts et /ou d'une poudre plus fine. L'utilisation d'un liquide prohibitif à l'agglomération comme l'alcool, est souvent recommandé. Cependant, le lubrifiant utilisé doit être non réactif pour éviter toute oxydation de la poudre produite. L'heptane est le moins réactif des environnements fluides de broyage pour les métaux [9].

#### 1. 4 INFLUENCE DU BROYAGE SUR LES PROPRIETES DES POUDRES

Le broyage des poudres métalliques produit des formes extérieures, des changements de texture et des changements structuraux internes. L'importance de ces changements est largement déterminée par les paramètres de broyage, l'environnement, ainsi que les propriétés physique et chimique du métal pur ou de l'alliage en cours de broyage. Ces changements successifs affectent les propriétés physiques du métal et le comportement de la poudre vis-à-

vis de la consolidation future des produits qui en résultent. Les caractéristiques de la poudre associée au broyage incluent les aspects suivants:

Aspects externes :

- La forme
- La texture
- La réflexion (l'éclat de surface)
- La taille des particules et leur distribution dans la masse de poudre

Aspects internes :

- Les structures composites et les agglomérés composites
- Le travail à froid (l'énergie emmagasinée)
- Une haute densité de dislocation
- Amélioration de l'homogénéité (alliages)
- Une taille de cristallite raffinée
- La composition chimique (incorporation de gaz de fluides à l'environnement de broyage)

Aspects physiques :

- Les propriétés mécaniques (la résistance à la déformation et la dureté)
- Les propriétés physiques (la résistivité électrique)
- Les propriétés chimiques (la corrosion)
- Les propriétés de la métallurgie des poudres (la densité apparente, la coulabilité, la frittabilité, la compressibilité et la densité frittée)

Les variables qui influencent les caractéristiques du produit broyé, peuvent être utilisées pour l'amélioration des performances du produit. Grâce à leurs propriétés particulières, les poudres métalliques peuvent être utilisées pour accomplir des applications innovatrices qui ne sont pas possibles par la métallurgie conventionnelle

## 1.5 LE BROYAGE A PERCUSSION

Le broyeur utilisé dans ce travail de recherche est un broyeur à lames, constitué d'une chambre de broyage de forme semi-circulaire. A l'intérieur de cette chambre, un disque est fixé sur un arbre à l'aide d'une goupille. L'arbre est couplé à un moteur électrique de vitesse variable avec un joint d'Oldham pour corriger le manque de coaxialité éventuelle entre les deux arbres. Sur la circonférence du disque, huit outils de broyage sont fixés par un système de vis écrou. La chambre de broyage est fermée par un couvercle sur lequel sont soudés des outils fixes sur une trajectoire circulaire. Le couvercle est monté sur la chambre grâce à deux tiges filetées dont l'action permet de régler l'écartement entre les outils fixes et les outils mobiles de broyage. L'ensemble est fixé sur un châssis de forme rectangulaire comme le montre la figure 1.9 ci dessous.

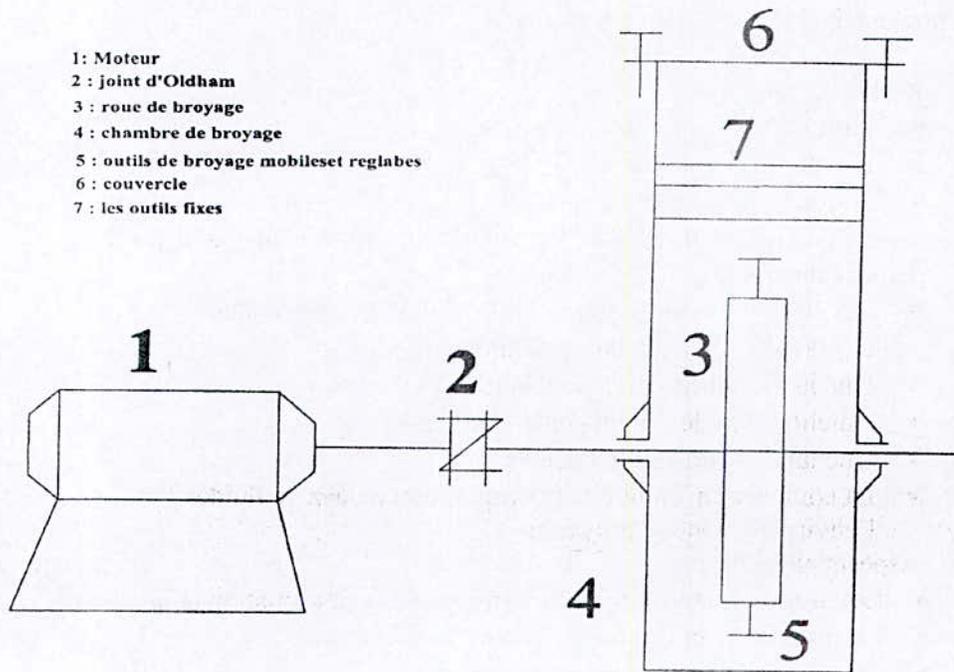


Figure 1.9 : schéma du broyeur à percussion [10]

Le principe du broyage dans cette machine est basé sur trois mécanismes qui sont :

- Le cisaillement
- La percussion ou l'impaction
- L'attrition

La désintégration des matériaux par cisaillement a lieu dans la première demi-heure de broyage. C'est le mécanisme dominant de broyage durant toute cette période. En effet, durant ce temps, la taille des particules est assez grossière, elle est plus grande que l'écartement entre les outils fixes et les outils mobiles. Comme conséquence, le matériau broyé est rapidement réduit en taille par cisaillement entre les outils fixes et mobiles. Dans la phrase suivante, les particules de poudre issues du cisaillement sont alors projetées à grande vitesse par les outils mobiles contre les outils fixes et les parois de la chambre. Ce micro forgeage par percussion à froid subi par les particules, provoque leur écrasement puis une initiation et une propagation des fissures qui conduit par la suite à leur pulvérisation. L'attrition qui est également un mécanisme important qui participe à l'affinage des particules, a lieu pendant toute la durée du broyage. C'est un mécanisme qui résulte du frottement inter-particules. C'est le mécanisme principal responsable de l'écaillage [10]. Un exemple de forme de poudre obtenu par ce procédé est montré dans la figure 1.9 ci-dessous.

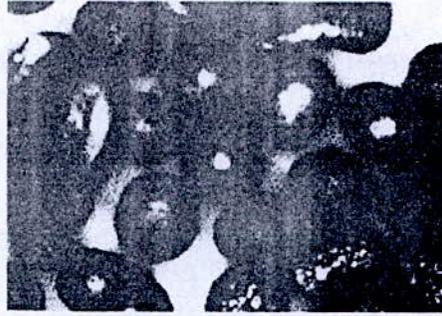


Figure1.10 : photomicrographie optique montrant un exemple de structure de poudre obtenue par broyage mécanique à percussion [10]

## CHAPITRE 2 : LES EQUIPEMENTS DE BROYAGE

### 2. 1. INTRODUCTION

Durant la pulvérisation à froid des matériaux, la machine de broyage est mise sous état de contrainte. Un nombre maximum de particules individuelles de la masse de poudre, est ainsi sollicité pour initier la fracture avec un minimum d'énergie. Les mouvements relatifs des charges broyantes et broyées varient selon le type du broyeur. En effet, les particules de poudre sont soumises à plusieurs sollicitations. Celles-ci sont dues au mouvement des boulets individuels, et au mouvement de l'ensemble de la masse des boulets. Le degré d'énergie requise pour les forces d'impact, de cisaillement, d'attrition et de compression dépend de ces sollicitations et donc de la charge broyante. Ces phénomènes agissent individuellement ou collectivement sur les particules de la poudre.

### 2.2 LE BROYEUR A BOULET TUMBLER

Dans le broyeur Tumbler montré dans la figure (2.1), le mouvement des boulets ou des tiges dépend de la vitesse de rotation des parois de la chambre. Les boulets peuvent rouler, tomber en cascade sur la surface de la charge dans des séries de couches parallèles, ou peuvent être projetés dans l'espace. Dans ce type de broyeur, il y'a une vitesse de rotation maximale de la chambre à ne pas dépasser, pour éviter aux boulets de coller sur la paroi de la chambre par les forces centrifuges. Cette vitesse est une caractéristique essentielle du broyeur.

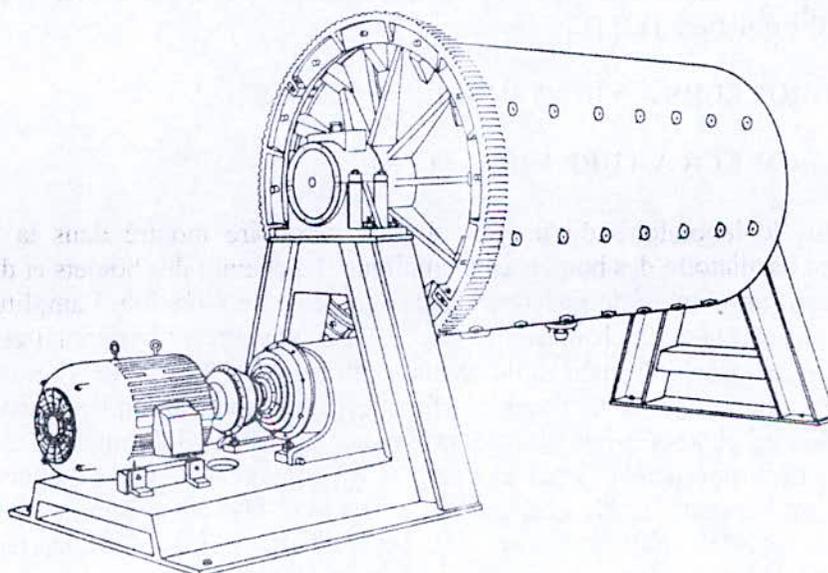


Figure (2.1) : le broyeur Tumbler utilisé pour la production des poudres de métaux [11]

#### 2.2.1 LES PARAMETRES DE CHARGE D'UN BROYEUR A BOULETS

Le taux de broyage d'une poudre est une fonction de la quantité de poudre dans le volume total entre boulets. Il atteint sa valeur maximale quand le remplissage de la poudre est à 100%. C'est à dire que l'espace entre boulets est complètement rempli de poudre. La vitesse de broyage doit être réglable pour assurer l'opération avec les proportions requises des boulets pour la cascade ou pour la cataracte. Cette proportion est largement dépendante de la

vitesse de rotation et du coefficient de friction du matériau constituant la charge broyée. Avec la taille croissante du boulet, la proportion de broyage augmente, atteignant son maximum lorsque les boulets atteignent une taille leur permettant d'écraser toutes les particules de la poudre remplie [11]. Si le glissement de la charge contre les parois de la chambre de broyage est considéré négligeable, la vitesse de rotation critique du broyage peut être calculée par la relation suivante [11]:

$$N_c = 76.6 \sqrt{\frac{1}{D}} \quad (2.1)$$

Où :

D : le diamètre interne du broyeur.

$N_c$  : la vitesse critique de rotation du broyage (en tr/min)

Ces paramètres sont approximatifs, et peuvent ne pas être valides pour les particules de métaux qui tendent à s'agglomérer par soudure à froid. Le mélange à l'état solide peut être mené dans le broyeur à boulets Tumbler, utilisant un diamètre de boulet variant de 16 à 25 mm, et un broyeur de diamètre variant de 1,5 à 1,8 m, et dans le cas où les autres conditions encourageant l'agglomération par soudure à froid sont satisfaites. Pour les grands plateaux de production de superalliage alliés mécaniquement, le broyeur Tumbler remplace le broyeur à attrition. Les temps de broyage pour le broyeur Tumbler sont plus longs pour atteindre le même niveau de mélange mené dans le broyeur à attrition ou à vibration, mais la productivité est en générale substantiellement plus grande. Généralement, les broyeurs Tumbler sont utilisés pour pulvériser ou écailler (mettre sous forme de flocons) les métaux en utilisant un aide broyage ou lubrifiant, pour prévenir l'agglomération par soudure à froid et pour minimiser l'oxydation. [12] [13].

### 2.3 LES BROYEURS A VIBRATION DE BOULETS :

#### 2.3.1 LE BROYEUR A TUBE VIBRATOIRE :

Dans le laboratoire du broyeur à tube vibratoire montré dans la figure (2.2), le mouvement oscillatoire des boulets est compliqué. Le chemin des boulets et des particules est déterminé par un nombre de facteur incluant la vitesse de vibration, l'amplitude, la courbure des cotés des parois de la chambre de broyage, son mouvement horizontal et le contact de la charge avec la surface du haut de la chambre de broyage. Les boulets tournent le long des parois de la chambre, et se déplacent parfois horizontalement selon des chemins spiraux. La rotation dans les chambres cylindriques provoque parfois des déformations et/ou des rainures dans les parois intérieures de la chambre. Ces rainures peuvent s'étendre jusqu'à 360°, dépendant de la possibilité de contact des boulets avec la surface supérieure des parois de la chambre. Les boulets tournent aussi à différentes vitesses et directions, causant une action de cisaillement substantiel qui est désirable dans les opérations de mélange.

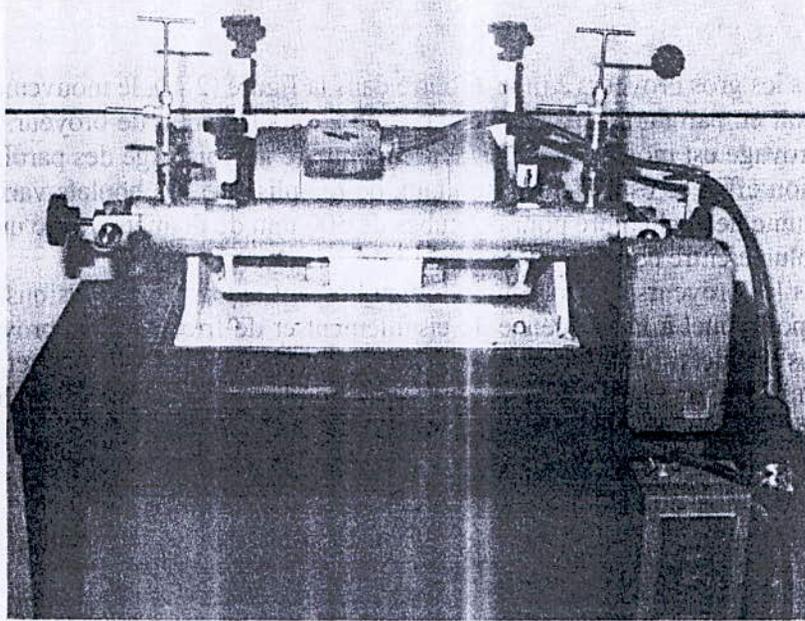


Figure (2.2) : le broyeur à boulets à vibration Megapact [11]

Les forces d'impact agissant sur les poudres dans un broyeur à vibration sont des fonctions du taux de broyage, de l'amplitude de vibration et de la masse broyante. Les forces de broyage, de haute énergie, peuvent être obtenues en utilisant des hautes fréquences de vibration avec des petites amplitudes de vibration. Le broyeur montré dans la figure (2.2.) opère à 3300 tr/min, avec une amplitude de 2 mm donnant un taux maximum d'accélération de 12.2.g où g est l'accélération gravitationnelle. Les broyeurs de grande production, opèrent à des fréquences relativement basses avec des grandes amplitudes (par exemple, 1000 à 1500 tr/min et jusqu'à 12 mm).

Le broyeur à boulets à vibration, est un excellent moyen pour la production d'alliages à l'état solide et des métaux consolidés par diffusion, avec une capacité allant jusqu'à 4.5kg ou plus, dépendant de la densité apparente de la poudre. Les figures (2.3.a) et (2.3.b.) montrent la microstructure d'un alliage Al-Fe-Ce et une micrographie électronique de la diffusion d'oxyde dans le même alliage après le mixage à l'état solide dans un broyeur de laboratoire à vibration de type montré dans la figure (2.1.)

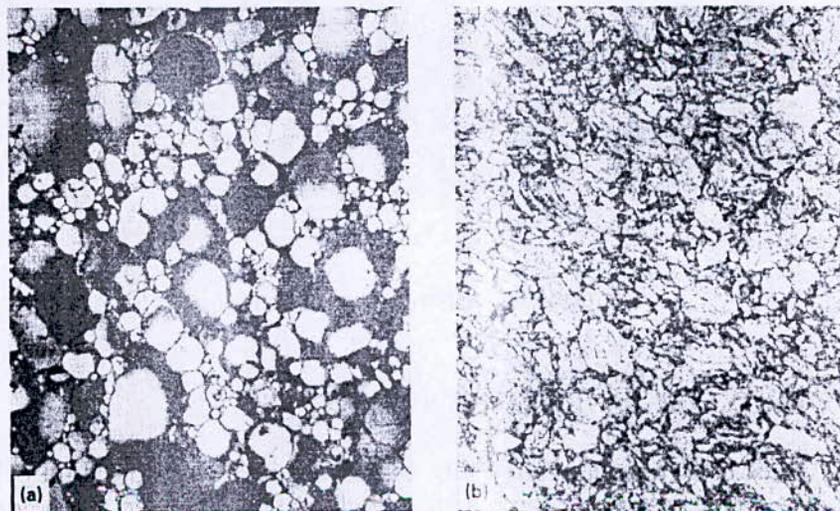


Figure (2.3) : Homogénéisation d'un alliage de AL-Fer-Ce au moyen d'un broyage à haute énergie [11]

Dans les gros broyeurs à tube, montré dans la figure (2.4.), le mouvement vibratoire du milieu décroît en partant des parois de la chambre vers le centre de broyeur. Par conséquent, l'effet du broyage est moindre dans le centre comparé au voisinage des parois de la chambre. Une opération efficace est obtenue à un taux de remplissage des boulets variant entre 60% à 80% du volume de la chambre pour des tubes de 500 mm de diamètre, avec un remplissage de 100% du volume entre boulets.

Dans les broyeurs à vibration, le milieu broyant reçoit des impulsions rapides avec un rapport proportionnel à la fréquence de cisaillement et de friction. Les broyeurs à vibration utilisent des boulets plus petits, à cause des grandes forces d'impact, fréquences et accélération. Ainsi, une plus grande surface spécifique est disponible pour le broyage. Le taux de traitement dans un broyeur à vibration est :

- Proportionnel à la densité des boulets (diamètre constant).
- Proportionnel au diamètre des boulets (densité constante).
- Proportionnel au cube de la fréquence de vibration et négligeable pour des vitesses comprises entre 900 et 1000 tr/min.
- Proportionnel à la racine carrée du rapport du diamètre des boulets sur le diamètre moyen des particules.
- Indépendant du diamètre de la chambre.
- Augmente lorsque la quantité de la poudre dans le broyeur diminue.
- Plus grand avec les boulets qu'avec des cylindres ou autres formes.

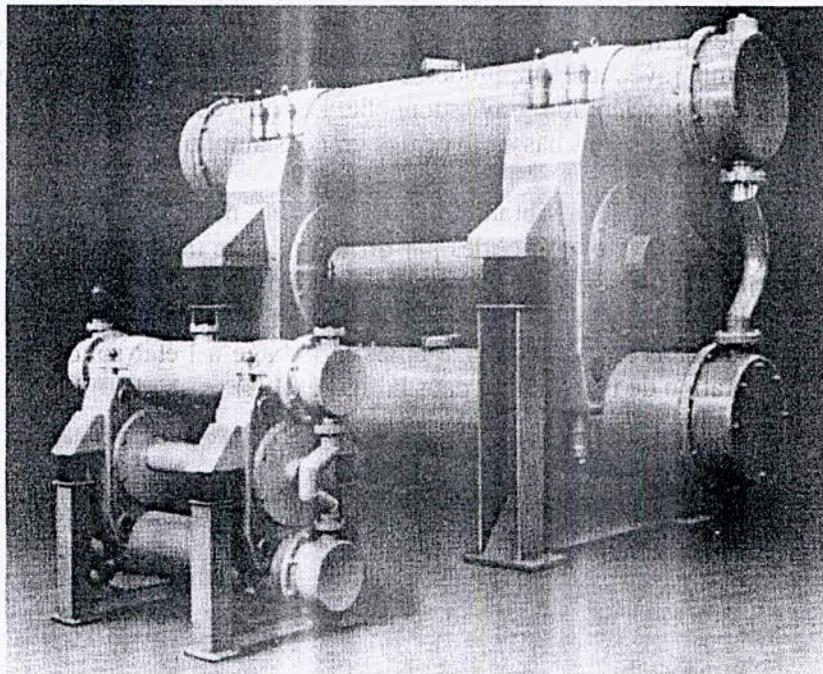


Figure (2.4) : Broyeur à vibration pilot [11]

### 2.3.2 LE BROYEUR A VIBRATION SWECO :

Ces broyeurs sont équipés avec des chambres en forme d'un cylindre vertical avec un axe solide au centre. Le moteur à double extrémité avec des poids excentriques est fixé au fond de la chambre, génère des vibrations tridimensionnelles à hautes

fréquences. L'ensemble du moteur et de la chambre, est monté sur une base qui repose sur des ressorts. La vibration du milieu broyant à l'intérieur de la chambre, crée l'action de broyage. Les vibrations sont transmises à partir des cotés et de la base de la chambre au milieu broyant. Les particules prises à l'intérieur du milieu sont cassées par l'effet de l'impaction à haute fréquence (figure 2.5).

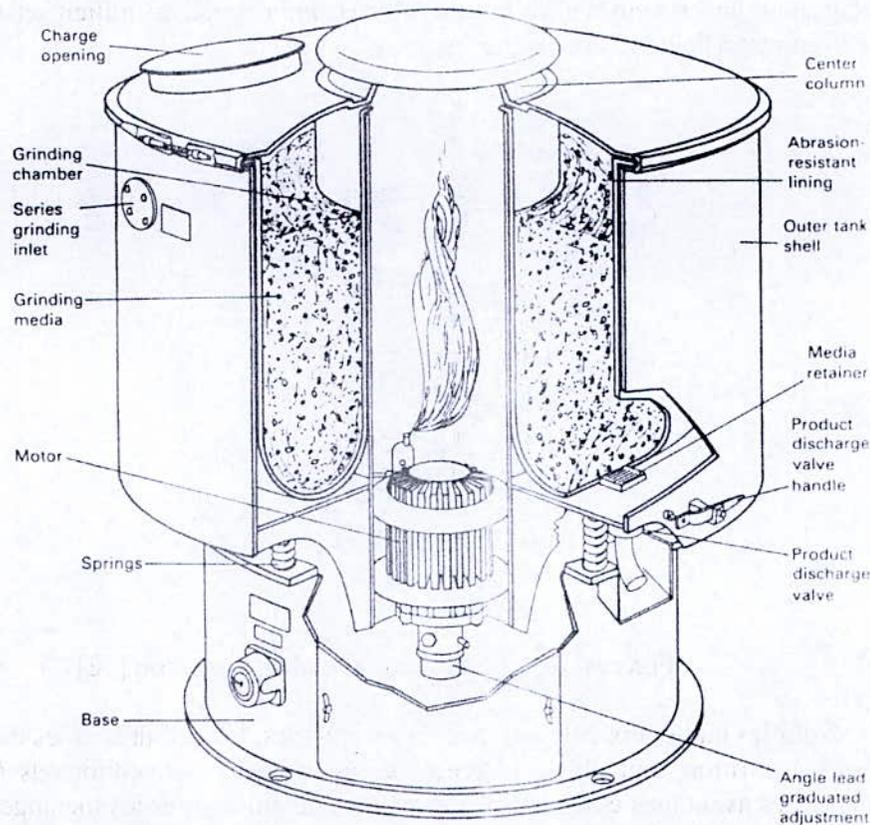


Figure (2.5) : Le broyeur SWECO pour le broyage humide à vibration [12]

Le milieu est emballé pour donner une densité d'empaquetage plus ou moins maximale. La masse empaquetée tourne lentement dans un plan horizontal. La masse empaquetée s'élève légèrement au voisinage des parois extérieures de la chambre et descend en approchant les parois intérieures de la chambre. Ce mouvement facilite la distribution de charge dans le cas d'un broyage à sec, et sert à maintenir les solides en suspension dans le cas d'un broyage humide. Le broyeur SWECO n'est pas très utilisé pour le broyage des poudres de métaux. Il est particulièrement mal adapté pour les métaux de haute densité, parce que les hautes densités causent l'entassement des particules au fond et qui deviennent plaquées.

#### 2.4 LES BROYEURS A ATTRITION

Dans le cas d'un broyeur à attrition montré en figure 2.6, le broyage est influencé par l'action de remuement d'un agitateur qui a un axe de rotation vertical avec des bras horizontaux. La rotation de l'agitateur cause un mouvement différentiel entre les boulets et le matériau au cours du broyage. Par ce fait, le degré de contact en surface est plus haut que celui atteint dans le broyeur Tumbler ou à vibration.

Le broyage est accompli par l'effet conjugué des forces d'impact et de cisaillement. Le produit broyé est percuté par les boulets qui se déplacent suivant

différentes trajectoires. Dans leur mouvement chaotique, ils heurtent à l'intérieur de la charge dilatée les fragments de poudre en les désintégrant. Tandis que les broyeurs à boulets utilisent de gros boulets de broyage (12.7mm ou plus), et tournent à des vitesses de rotation de l'ordre de 10 à 50 tr/min, le broyeur à attrition lui, utilise des billes de 3 à 6 mm de diamètre avec un agitateur qui tourne à des vitesses de l'ordre de 60 tr/min pour les unités de production, et à 300 tr/min pour les unités de laboratoire. La puissance d'entrée dans le broyeur à attrition est utilisée pour agiter le milieu, et non pour faire tourner ou vibrer le lourd contenu du récipient.

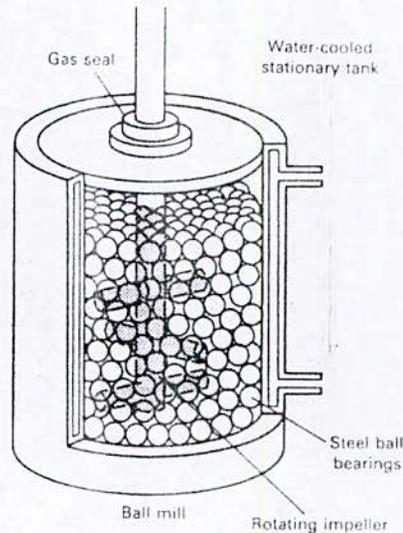


Figure (2.6) : Le broyeur à boulets à attrition [12]

Pour les matériaux durs tels que les céramiques, les carbures et les métaux durs, les broyeurs à attrition sont plus efficaces que les broyeurs conventionnels à vibration ou Tumbler. Les avantages essentiels des broyeurs à attrition pour les mélanges et le mixage des poudres à outils de coupe en carbure de tungstène ou cobalt, incluent un court temps de broyage, et une production de particules de taille fine de l'ordre du micron. Les broyeurs à attrition broient effectivement les métaux dans une atmosphère inerte, comme pour les processus d'alliage à l'état solide.

#### 2.4.1 LE MECANISME DU BROUYEUR A ATTRITION

L'arbre central tournant d'un broyeur à attrition équipé des bras horizontaux robustes, exerce une action d'agitation, suffisante pour culbuter le milieu broyant aléatoirement à travers le volume entier, causant un mouvement irrégulier par :

- L'action de l'impact sur le milieu.
- La force de rotation dans le milieu.
- La force de culbutage.

Pour le broyage fin, les forces d'impact et de cisaillement doivent être présentes simultanément. Dans le broyeur à attrition, l'impact est causé par le contact constant du milieu de broyage du au mouvement irrégulier. L'action de cisaillement est produite par le mouvement aléatoire des boulets dans différentes directions de rotation, laquelle exerce des forces de cisaillement sur la buée adjacente. La plus grande agitation du milieu agit au point qui se trouve aux deux tiers du chemin à partir du centre. Le broyage n'agit pas sur les parois de la chambre, qui sert non pas comme surface de broyage mais comme récipient. Une usure minimale des parois de la chambre assure une longue durée de vie

pour le broyeur. Dans le broyage à attrition, le temps de broyage est relié au diamètre des billes et à la vitesse de l'agitateur sous les conditions données par :

$$t = \frac{kd}{\sqrt{n}} \quad (2.2)$$

Où :

t : temps de broyage requis pour obtenir une certaine taille moyenne.

k : une constante qui varie avec la poudre procédée et du type du milieu et du broyeur utilisé.

d : diamètre de la chambre.

n : la vitesse de l'arbre en tr /min.

Les broyeurs à attrition sont classés en deux types : les broyeurs à fournée continue et à circulation. Dans le broyeur à fournée, le matériau est introduit dans la chambre revêtue et est broyé jusqu'à la taille de particules voulue. Les parois de la chambre son revêtues de telle façon que l'eau chaude ou froide, circule librement pour contrôler et maintenir la température de la fournée. Les broyeurs à attrition à fournée peuvent aussi broyer les matériaux visqueux, et ils sont recommandés pour le broyage à sec et pour la désintégration des métaux endurcis.

Le système de mouture par circulation comprend un broyeur à attrition avec un grand réservoir, généralement dix fois plus grand que le volume de l'unité de broyage. Les broyeurs à attrition ont généralement des taux élevés de pompage. Normalement, le contenu du réservoir passe à travers le système, à raison de dix fois par heure. Les avantages du broyeur à attrition à circulation sont les grandes quantités de matière pouvant être manipulées avec un investissement minimum dans le milieu de broyage et l'équipement

## 2.5 LE PROCESSUS D'IMPACT COLD-STREAM :

Le processus Cold-Stream est un processus à vitesse élevée. Dans ce cas, le matériau est entraîné dans un courant à gaz et est projeté contre une cible stationnaire. Après que le matériau ait frappé la cible puis fracturée, il est enlevé de la chambre d'impact par aspiration. Le matériau est ensuite transporté vers un classificateur qui permet aux produits de grosses tailles de tomber dans un récipient de stockage pour un impact ultérieur contre la cible. Le produit final est séparé par le classificateur, puis transporté vers les conteneurs de collection. La chambre dans ce procédé est revêtue avec du carbure de tungstène ou un autre matériau résistant à l'usure. La lance supersonique et la cible sont en générale fabriquées à partir des carbures de tungstène cimentés, mais les autres matériaux résistant à l'usure peuvent être utilisés pour fabriquer ces composantes. La figure (2.7) montre un courant de matériau brut à grande vitesse, percutant une cible en se fracassant.

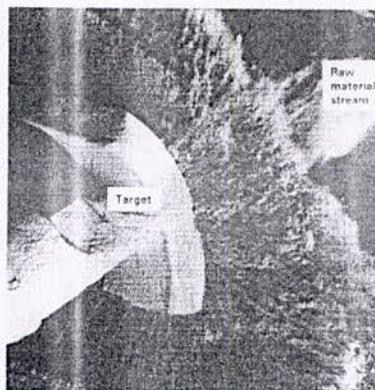


Figure (2.7) Courant de matériau brut percutant une cible en se fracassant dans le procédé d'impact Cold-stream [12]

La propagation rapide du gaz excitant la lance, crée un grand effet rafraîchissant à travers une détente adiabatique. Cet effet est plus grand que la chaleur générée par la pulvérisation. Un compresseur qui débite jusqu'à  $56 \text{ m}^3/\text{min}$  d'air à  $6.9 \text{ MPa}$ , est utilisé. De tels compresseurs peuvent alimenter deux ou trois systèmes d'impact Cold-stream simultanément.

Le procédé d'impact Cold-stream est utilisé pour pulvériser les matériaux durs, abrasifs et relativement chers, comme les carbures de tungstène, les alliages de tungstène, le molybdène, les aciers à outil, le béryllium et d'autres alliages. Le processus convertit rapidement des particules atteignant 6 Mesh à une taille de l'ordre du micron. Les avantages du procédé incluent la simplicité, un bas coût des opérations, une basse température pendant les opérations (ce qui prévient l'oxydation), et une aptitude à retenir une haute pureté et à contrôler la taille des particules du matériau à travers le temps de pulvérisation.

Le coût élevé du traitement additionnel Cold-stream est justifié par la production d'une poudre plus fine que celle disponible commercialement par atomisation. La plupart des poudres atomisées ont un film mince d'oxyde en surface des particules, ce qui est remarquable pour les poudres grossières d'acier de composition non inoxydable. Durant le procédé Cold-stream, le film fragile d'oxyde est rayé du métal puis fracassé en fine poussière. Le procédé Cold-stream produit en général une poudre d'oxyde qui est ultérieurement séparée de la poudre du métal produit.

## 2.6 LE BROYAGE A HAUTE ENERGIE :

Les broyeurs à vibration, à attrition et le broyeur Tumbler de grand diamètre peuvent être classés dans l'ordre des broyeurs à haute énergie. Ils sont effectivement utilisés dans les processus de fabrication d'alliages mécaniques à partir des poudres pures, ou pour la production de poudre à partir de métaux à l'état solide. La figure (2.8) fournit les capacités des équipements typiques de réduction de taille, pour le broyage d'un matériau de taille d'entrée donnée, à une taille désirée du produit. La figure inclut la pulvérisation des matériaux céramiques ou métalliques, durs et/ou fragiles.

Les applications qui conviennent au broyage de haute énergie incluent :

- Le flaconnage des poudre des métaux [12] [14].
- L'alliage mécanique [6] [7] [17] [15] [16].
- La poudre composite [18].
- Le contrôle des formes des particules.
- Le contrôle de la coulabilité des poudres.
- Le contrôle de la densité apparente des poudres.
- Le carbure de tungstène et ses alliages.
- Le mélange par métallurgie des poudres [18].
- L'alliage des éléments non miscibles à l'alliage [17].
- Le contrôle de la taille des particules.
- Les poudres ultra fines [5] [19].
- Le frittage activé [7].

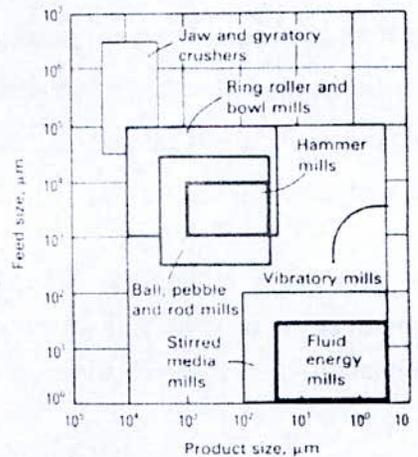


Figure (2.8) : Les capacités typiques de tailles des classes communes d'un équipement de réduction des tailles [12].

### 2.7 LES BROYEUR TIR « HAMMER ET ROD » :

Les broyeurs de « Hammer et Rod » sont utilisés dans l'industrie de la métallurgie des poudres, pour broyer de grandes quantités de gâteaux spongieux frittés. Ces gâteaux obtenus par réduction d'oxydes métalliques, sont des produits intermédiaires dans la production des poudres métalliques par broyage mécanique et séparation magnétique. Si de telles poudres sont utilisées dans les procédés conventionnels de la métallurgie des poudres, il est essentiel qu'elles développent de bonnes caractéristiques à vert comme la ductilité et la compressibilité. Pour ces raisons, les gâteaux spongieux frittés, doivent être réduits en poudre de taille typiquement < 80 mesh suivi d'un recuit d'adoucissement pour améliorer leur ductilité. Les broyeurs de « Hammer et Rod », battis en écran ou d'autre mécanismes de séparation, sont plus recommandés pour obtenir ces propriétés

## CHAPITRE 3 : L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

### 1-INTRODUCTION :

Bien qu'il ne soit passé dans le domaine industriel qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, après la découverte par Paul Louis Toussaint Héroult et Charles Martin Hall du procédé de fabrication par électrolyse, l'aluminium est devenu le premier des métaux non ferreux. Sa légèreté, son inaltérabilité pratique, sa bonne conductivité électrique et thermique, sa facilité de décoration et la grande résistance mécanique de certains alliages, lui donnent de larges débouchés. Ainsi, il est particulièrement utilisé dans les secteurs industriels tels que, les transports, l'industrie électrique, l'emballage, le bâtiment et toutes les autres industries de transformation. Sa consommation a régulièrement doublé tous les huit ans depuis le début du siècle, jusqu'aux années soixante-dix.

Deux conditions principales s'imposent à l'industrie de l'aluminium pour sa rentabilité : une teneur d'une tonne d'aluminium pour 4 à 5 tonnes de minerai de bauxite et une consommation d'énergie électrique d'environ 13 000 kWh par tonne d'aluminium produit.

La vulgarisation des possibilités et des techniques d'emploi de ce métal a permis aux différents secteurs de l'industrie de prendre conscience des avantages de l'aluminium. Tant d'efforts n'ont fait que favoriser la croissance des débouchés pour ce métal. Le rythme de croissance d'utilisation depuis le début du siècle, a atteint le double tous les 10 ans [20].

Environ 60% de la production de l'aluminium rentre dans l'élaboration des alliages légers. Ce sont des alliages à caractéristiques moyennes (bonne résistance à la corrosion, mise en forme facile,... etc.), qui ont permis l'extension des domaines d'application souvent en compétition avec d'autres matériaux [21].

## 2 L'ALUMINIUM INDUSTRIEL (Al ≥ 99,00 %).

### 2-1 INFLUENCE DES IMPURETES.

L'aluminium industriel contient généralement 0,5% d'impuretés, principalement du fer et du silicium. Mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique (Al > 99,99 %). Ces impuretés peuvent avoir des effets différents sur certaines propriétés. Ainsi, la conductivité électrique par exemple diminue avec toutes les additions ou impuretés. Ce point

est important pour l'utilisation de l'aluminium dans les conducteurs électriques. [22]. L'effet des impuretés et additions sur d'autres paramètres peut être résumé comme suit :

- Le **Ti** (de 0,05 à 0,1 %) et le **B** (de 0,005 à 0,01 %) affinent le grain lors de la solidification.
- La **Zr** (< 0,2 %) inhibe le grossissement des grains.
- Le **Si** (de 0,5 à 0,8 %) abaisse la tenue à la fissuration à chaud, mais augmente la tenue au fluage.
- Le couple (**Ni + Fe**) augmente la tenue mécanique à chaud.
- Le composé (**Cu + Ni + Sn + Pb**) doit être inférieur à 0,1 % pour augmenter la résistance à la corrosion.
- Le couple (**Cr et Mn**) est favorable à la résistance à la corrosion.

### 3-PROPRIETES DE L'ALUMINIUM :

#### 3-1-PROPRIETES PHYSIQUES :

##### 3-1-a) Propriétés atomiques et cristallines

- numéro atomique ..... 13
- masse atomique ..... 26.947

L'aluminium a une structure cubique à faces centrées avec les caractéristiques suivantes :

- rayon atomique ..... 1.4286 Å°
- distance interatomique ..... 2.858 Å°

##### 3-1-b) Densité :

L'aluminium à 99.996 % a une densité de 2.699 gr/cm<sup>3</sup> à 20 °C.

La densité augmente légèrement lorsque le titre du métal baisse. Elle est par exemple de

2.705 à 20 °C pour Al à 99.5 %. Au point de fusion, la densité est :

- 2.55 gr/cm<sup>3</sup> à 660 °C (phase solide)
- 2.382 gr/cm<sup>3</sup> à 660 °C (phase liquide)

Ce qui correspond à une contraction volumique de 6.6 % à la solidification. La densité de l'aluminium liquide en fonction de la température est déterminée par la formule suivante :  
 $d_7 = 2.382 - 0.000273 (T - 660)$

**3-2-PROPRIETES THERMIQUES :**

Point de fusion	660 .24 °C pour Al à 99.996 %
Chaleur de fusion	92 μth/g
Point d'ébullition	2056 °C sous 760 mm Hg
Tension de vapeur	0.00062 mm Hg à 660 °C 1 mm Hg à 1030 °C

**Tableau.3 .1 : quelques caractéristiques thermiques de l'aluminium.****Coefficient de dilatation de moyen :**

Intervalle de température	Coefficient de dilatation moyen x 10 <sup>6</sup>
20-100	23.8
20-200	24.6
20-300	25.4
20-400	26.5
20-500	27.7
20-600	28.7

**Capacité thermique massique** à 20 °C :  $c = 950 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

**Conductibilité thermique** à 20 °C :  $\lambda = 217,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

**Résistivité électrique** à 20 °C :  $\rho = 2,63 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ .

La conductibilité électrique de l'aluminium est égale à 65% celle du cuivre.

**3-3- Conductibilité électrique de l'aluminium**

La résistivité de l'aluminium le plus pur (99.999 %) parfaitement recuit est de  $2.630 \mu\Omega$  à 20 °C. La conductibilité de l'aluminium commercial ou des alliages est inférieure à cette valeur. On peut expliquer que la conductibilité de l'aluminium diminue, en premier lieu, par les impuretés qu'il peut contenir. Les atomes des métaux en solution provoquent des distorsions du réseau cristallin. Ceux-ci freinent le déplacement des électrons. Cette action est beaucoup moins sensible si l'impureté est hors solution. En second lieu, la conductibilité est affectée par l'écroutissage, qui perturbe profondément l'ordonnance du réseau cristallin. Enfin l'élévation de température augmente l'agitation thermique des atomes autour de leur position d'équilibre.

**3-4-Propriétés mécaniques :**

Les propriétés mécaniques intrinsèques de l'aluminium sont les suivantes :

Module d'élasticité .....	6700 kg/mm <sup>2</sup>
Module de torsion .....	2700 kg/mm <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson .....	0.34

Les caractéristiques mécaniques de l'aluminium varient beaucoup selon la nature des impuretés et leur teneur, ainsi que suivant la genèse du corroyage et du recuit du métal.

Pour l'aluminium raffiné le plus pur, à 99.999 %, on a trouvé sur un fil de 1.5 mm recuit pendant 113 h à 130 °C les caractéristiques suivantes [20]:

Charge de rupture ..... 5.2 kg/mm<sup>2</sup>  
 Allongement ..... 62 %

Le tableau ci-dessous [20] donne les chiffres couramment admis pour l'aluminium raffiné et l'aluminium ordinaire commerciaux laminés :

Type du métal	Etat du métal	Charge de rupture Kg/mm <sup>2</sup>	Limite élastique à (0.2%) Kg/mm <sup>2</sup>	Allongement %	Dureté brinell
99.997	Recuit	5	2	60	14
	Ecroui mi - dur	8	6	18	24
	Ecroui dur	13	9	10	31
99.5	Recuit	8	4	42	20
	Ecroui mi dur	11	10	10	29
	Ecroui dur	18	15	15	47

**Tableau 3.2 : Quelques caractéristiques mécaniques de l'aluminium pur aux états recuit, écroui mi-dur et écroui dur**

#### 4-RECUIT DE L'ALUMINIUM :

Le recuit de ramollissement de l'aluminium après écrouissage se fait d'autant plus vite et à température d'autant plus basse que l'aluminium est plus pur.

Pour l'aluminium à 99.5 %, il faut 1 h à 215 °C pour obtenir le recuit complet. L'aluminium à 99.999 % est déjà recuit complètement en 10 mn à 100 °C. A 16 °C, il conserve une vitesse de recuit notable et il se recuit encore lentement à 0 °C.

**4-1-Propriétés mécaniques à chaud :**

Al à 99.5 % laminé-recuit			
Température °C	Charge de rupture kg/mm <sup>2</sup>	Limite élastique à (0.2 %) kg/mm <sup>2</sup>	Allongement %
150	6	3	55
200	4	2.5	65
250	3	1.5	75

**Tableau 3.3 : Quelques propriétés mécaniques de l'aluminium laminé-recuit à hautes températures [20]**

**4-2-PROPRIETES MECANIKES AUX BASSES TEMPERATURES :**

Les caractéristiques de l'aluminium croissent aux basses températures comme le montre le tableau ci-dessous.

métal	Température °C	Limite élastique à (0.2 %) kg /mm <sup>2</sup>	Charge de rupture kg /mm <sup>2</sup>	Allongement %
A5 recuit	20	1.25	7	40
	-138	2	9.5	46
	-196	2.5	16	50
A5 écroui	20	7.5	8	22
	-138	8	11	32
	-196	10	16.5	42

**Tableau 3.4 : Quelques propriétés mécaniques de l'aluminium commercial recuit et écroui à basses températures [20]**

**5-PROPRIETES CHIMIQUES :****5-1-Réaction d'oxydation de l'aluminium :**

L'aluminium est un métal éminemment oxydable. Sa réaction d'oxydation est montrée ci-dessous.



La chaleur de combustion est de 1,588 MJ. mole<sup>-1</sup>. L'aluminium est cependant inaltérable dans l'air parce qu'il se recouvre, à froid, d'une mince couche protectrice d'alumine anhydre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> très adhérente et très compacte. Son volume étant de 1.28 fois celui du métal qui lui a donné naissance.

Une couche fraîche d'alumine naturelle a une épaisseur de l'ordre de 0.01 µm à froid. Il faut plus d'un an pour qu'elle atteigne 0.1 µm.

Par chauffage à l'air sec, on a une oxydation plus rapide. Par exemple à une température de 500 °C, nous avons la formation des couches suivantes :

- Al à 99.99 %, la couche fraîche de 0.01 µm passe à 0.07 µm en 12 h pour se stabiliser vers 0.09 µm après 48 h.
- Al à 99.5 %, la couche d'oxyde atteint 0.6 µm après 250 h à 500 °C et continue à croître.

Pour obtenir la combustion de l'aluminium (employée en pyrotechnie), il faut le projeter dans une flamme sous forme de poudre ou de fil fin.

## 5-2-Action de l'eau sur l'aluminium

Entre 0 et 100 °C, l'eau pure n'attaque pas l'aluminium. Il y a simplement augmentation de l'épaisseur de la couche d'oxyde. Par dessus la couche naturelle d' $Al_2O_3$  anhydre, s'édifie une couche d'un complexe de  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  cristallisée (bôhmite). On obtient ainsi, par ébullition dans l'eau distillée, une couche totale de 0.4 µm. Au bout d'une heure, elle peut atteindre plusieurs µm si l'on prolonge l'ébullition. Si l'on amalgame l'aluminium avec du mercure, celui-ci empêche la formation de la couche protectrice d' $Al_2O_3$ . Le métal est alors rapidement attaqué par l'eau, avec la formation de longues arborescences d'alumine hydratée. L'eau sous pression, à température supérieure à 100 °C, attaque un peu l'aluminium à 99.5 % et beaucoup plus rapidement l'aluminium raffiné à 99.99 %. La couche de bôhmite croît rapidement, atteignant 10 µm en 15 h à 165 °C. De plus, il y a une rapide attaque inter cristalline et la formation d' $Al_2O_3 \cdot H_2O$  aux limites des grains provoque une expansion de l'échantillon, dont la surface arrive à doubler en quelques heures. Il y a ensuite désagrégation par déchaussement des grains. Ce phénomène n'a pu être corrigé que par addition de fer et de nickel à l'aluminium raffiné. Un alliage à 0.5 % Fe + 0.5% Ni résiste plusieurs milliers d'heures dans l'eau à 350 °C.

## 6- ALLIAGES d'ALUMINIUM

### 6-1-Les alliages d'Aluminium

L'aluminium non allié a des propriétés mécaniques très réduites. Pour améliorer ces propriétés on est conduit à ajouter des éléments entrant en solution solide. Ceux-ci forment des précipités qui entraînent des compositions d'alliages industrielles de plus en plus complexes [22]. Cependant, L'aluminium pur a des emplois limités, sauf pour les conducteurs. Dès l'origine, on a cherché à faire des alliages pour avoir des caractéristiques mécaniques plus élevées.

L'aluminium peut entrer dans des compositions d'alliages avec le manganèse, le silicium, le magnésium, le zinc ou d'autres éléments. L'ajout à l'aluminium d'une petite quantité (0.5 à 3 %) d'un ou de plusieurs autres métaux suffit pour encore améliorer certaines propriétés précieuses de l'aluminium telles que la résistance, la dureté, la soudabilité ou la résistance à la corrosion [20]. Les alliages d'aluminium sont utilisés dans de nombreux

domaines tels que la construction, l'industrie mécanique, l'emballage, le secteur automobile l'aéronautique, ...etc. La diversité des applications des alliages d'aluminium a entraîné la multiplication de leur nombre aussi bien dans le domaine de la fonderie que dans celui de la transformation.

## 6-2-Les alliages de fonderie :

Les alliages de fonderie subissent une évolution parallèle à celle des alliages de laminage. Certains d'entre eux marquent dès le début, des étapes importantes dans le développement de l'industrie de l'aluminium. Notamment par la naissance d'alliages et de traitements particuliers à la fonderie. L'alliage eutectique Al-Si prend un développement très important grâce à la découverte des procédés d'affinage par le sodium et les sels alcalins. Cette technique d'affinage est appliquée aux alliages plus complexes de la famille Al-Si traitables thermiquement du fait d'une addition de Mg.

### 6-2-1-proprietes des alliages d'Aluminium de fonderie :

Les alliages d'aluminium destinés au moulage forment plusieurs familles se différenciant nettement de celles des alliages corroyés.

Le choix d'un alliage résulte souvent d'un compromis entre les propriétés de fonderie (coulabilité, absences de crique à chaud, forme et répartition du retrait volumique) et les propriétés d'usages exigées de la pièce (caractéristiques mécaniques, aspect de surface, aptitude au polissage et à l'anodisation, résistance à la corrosion, etc.).

Le choix du procédé de moulage (sable, coquille, coulée sous basse pression, coulée sous pression, cire perdue, thixomoulage, etc.), s'il est le plus souvent dicté par des considérations économiques liées à la taille et à la forme des pièces ainsi qu'à l'importance des séries, intervient également sur les caractéristiques relevées dans les pièces.

Le refroidissement plus rapide obtenu par la coulée en coquille donne aux pièces une structure métallurgique plus fine et améliore, par rapport au même alliage coulé en sable, les charges de rupture et les allongements dans des proportions parfois importantes.

Les alliages de moulage sont élaborés soit :

- à partir d'aluminium provenant directement des cuves d'électrolyse auquel on ajoute les éléments constitutifs de l'alliage : ce sont les alliages de première fusion.
- à partir de déchets récupérés, assortis et purifiés : ce sont les *alliages d'affinage*, qui assurent actuellement environ les  $\frac{2}{3}$  de la production totale des pièces de fonderie.

### 6-3-structures des alliages d'Aluminium moulés :

Les propriétés des alliages d'aluminium de fonderie dépendent principalement de leurs structures, terme que nous utilisons ici dans un sens élargi. Ces structures dépendent de quatre groupes de facteurs principaux, que nous allons décrire brièvement. Du fait de l'absence de transformation à l'état solide au cours du refroidissement des pièces, les *paramètres de solidification* agissant sur ces structures prennent une importance particulièrement grande [23]

### 6-4-finesse de la structure de solidification

Ces structures brutes de fonderie sont assez bien représentées par les diagrammes d'équilibre binaires que forme l'aluminium avec les éléments d'addition principaux comme le silicium, le cuivre, le magnésium ou le zinc. Les alliages sont constitués en proportions plus ou moins grandes, suivant le cas, de cristaux d'une phase riche en aluminium, noyés dans un mélange eutectique, en présence de phases ou de composés intermétalliques généralement

fragiles.

Les cristaux de la phase riche en aluminium contiennent en solution solide une petite proportion des éléments d'alliages (Si, Cu ou Mg). L'eutectique est un mélange fin de cette solution solide et de cristaux de silicium (cas des alliages Al-Si), de  $Al_2Cu$  (cas des alliages Al-Cu) ou de  $Mg_2Al_3$  (cas des alliages Al-Mg). L'eutectique a une composition bien définie : aluminium à 13 % silicium, aluminium à 33 % cuivre, aluminium à 35 % magnésium. Selon que la composition globale de l'alliage est plus ou moins proche de la composition eutectique.

#### 6-5-Les alliages aluminium silicium :

Les alliages aluminium-silicium contiennent toujours une proportion d'eutectique importante, que l'on retrouve en présence soit de dendrites primaires d'aluminium dans le cas des alliages hypoeutectiques ( $Si < 12.6 \%$ ), soit de cristaux polyédriques de silicium dans le cas des alliages hypercutectiques ( $Si > 12.6 \%$ ). A la composition eutectique de 12.6 %, on observe toujours la présence de fines dendrites primaires d'aluminium ou de cristaux de silicium primaires, selon les impuretés présentes dans l'alliage. Le caractère irrégulier de cet eutectique, lié à la croissance non couplée de l'aluminium et du silicium, lui confère souvent l'appellation d'eutectique divorcé.

## CHAPITRE 4 : PROCEDURE EXPERIMENTALE

### 1- Introduction :

Le recyclage des déchets résultant de l'usinage des pièces métalliques, est d'une importance capitale pour l'industrie métallurgique et mécanique. Ce recyclage consiste à transformer ces copeaux en une poudre de forme et de taille qui répondent adéquatement à sa destination finale. Dans le cas du recyclage dans le domaine des pièces auto motives, la poudre sera mise en forme par compactage à froid, suivi d'un frittage à haute température pour déclencher les processus de diffusion inter particules. Pour atteindre les propriétés finales désirées, il est souvent recommandé de déformer plastiquement par estampage les comprimés frittés pour se débarrasser de la porosité résiduelle ainsi que du film d'oxyde qui se forme sur la surface des particules.

Ainsi, des copeaux d'aluminium sont utilisés pour fabriquer une poudre d'aluminium en utilisant un broyeur à percussion à lames, conçu et réalisé par Ourahmoune [ref]. Après un broyage mécanique contrôlé, la poudre obtenue est caractérisée par tamisage, pour déterminer la taille moyenne du produit broyé, et par microscopie optique pour la morphologie des particules obtenues. Pour rendre l'étude plus exhaustive, on a étudié l'influence des paramètres suivants sur la taille et la forme des particules de poudre obtenues:

- Le temps de broyage
- La vitesse de broyage.
- La charge broyée.

Finalement, une comparaison avec des résultats obtenus par le même procédé mais avec des matériaux différents a été réalisée [10,24].

### 2- Fabrication des copeaux :

Les copeaux ont été fabriqués à partir d'un lingot cylindrique d'aluminium par usinage au tour. La vitesse de rotation du mandrin a été fixée à une valeur de 365 tr/min. Des profondeurs de passe et des vitesses d'avance adéquates ont été sélectionnées pour obtenir des copeaux de taille différentes et de forme voulues.

### 3- Caractérisation des copeaux :

Après avoir produit une grande quantité de copeaux, on a procédé à leur caractérisation par tamisage. Pour ce faire, des tamis sont superposés dans l'ordre croissant de leurs ouvertures. La série repose sur un bas fond également appelé assiette. La quantité de copeaux est versée dans le tamis supérieur qui est ensuite fermé par un couvercle. L'ensemble est soumis à l'action d'un vibreur de tamis et est agitée par des mouvements de secousses et de rotations pendant 10 minutes. Les copeaux retenus par chaque tamis et l'assiette sont pesés. Finalement le diamètre moyen des copeaux est calculé par la formule suivante

$$D_m = O_1 X_1 + \frac{O_1 + O_2}{2} X_2 + \frac{O_2 + O_3}{2} X_3 + \dots + \frac{O_n + O_{n+1}}{2} X_{n+1} \quad (4.1)$$

où:

$D_m$ : la taille moyenne des particules en  $\mu m$ .

$O_1, O_2, \dots, O_n$ : ouvertures des tamis en  $\mu m$

$X_1, X_2, \dots, X_{n+1}$ : les fractions des refus retenus par les tamis.

#### **4-Description du broyeur :**

Le broyeur utilisé est un broyeur à lames à percussion, constitué d'une chambre de broyage de forme semi-circulaire. A l'intérieur de cette chambre, un disque est fixé sur un arbre à l'aide d'une goupille. L'arbre est couplé à un moteur électrique à vitesse variable avec un joint d'Oldham pour corriger le manque de coaxialité éventuel entre les deux arbres. Sur la circonférence du disque, huit outils de broyage sont fixés. La chambre de broyage est fermée par un couvercle sur lequel sont soudés des outils fixes sur une trajectoire circulaire. Le couvercle est monté sur la chambre grâce à deux tiges filetées dont la rotation permet de régler l'écartement entre les outils fixes et les outils mobiles de broyage. L'ensemble est fixé sur un châssis de forme rectangulaire comme le montre la figure 4.1

#### **5- Processus de broyage :**

Les copeaux placés à l'intérieur de la chambre de broyage sont percutés par les outils mobiles du disque tournant contre les outils fixes du couvercle et de la paroi de la chambre du broyeur. Les particules métalliques sont ainsi entraînées dans un mouvement de trajectoire semi-circulaire provoquant leur désintégration. La pulvérisation des copeaux se réalise par cisaillement dans la partie supérieure du broyeur, suivi d'un roulement dans la partie circulaire inférieure de la machine, lui conférant ainsi une forme particulière et caractéristique de ce procédé.

#### **6- Description des tamis :**

Ce sont des récipients cylindriques sur lesquels sont tendus des filtres à mailles carrées plus ou moins serrés de fil d'acier inoxydable pour cribler des matières en grain, liquide, ou pulvérulente. Les particules qui passent l'ouverture de ces tamis sont celles qui ont une taille inférieure à celle de l'ouverture, alors que celles qui sont de taille supérieure ou égale sont retenues et sont de ce fait appelées : refus.

#### **7 -Description de la tamiseuse :**

C'est un appareil assurant l'agitation du groupe de tamis placé en série dans l'ordre croissant. La série de tamis ainsi que l'assiette qui sert à retenir les particules fines et le couvercle refermant le dernier tamis, sont coincés entre les anneaux supérieur et inférieur de la tamiseuse. L'ensemble ainsi scellé par un système de fixation reçoit les vibrations de hautes fréquences données par un moteur électrique. Cela conduit à un mouvement aléatoire des particules, donc à leur séparation. Cette opération dure en moyenne 10 minutes.

#### **8- Description de la balance :**

Elle est utilisée pour la pesée des fractions de poudre retenues par chaque tamis. Cette opération constitue la dernière étape dans la caractérisation de la taille des particules

de poudre par tamisage. C'est une balance électronique qui repose sur 4 appuis réglables qui servent à assurer la planéité de la surface horizontale de la palette et une distribution homogène de la charge. Sa précision est de l'ordre de  $\pm 0.1$  gr.

## CHAPITRE 5 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

### 5.1 INTRODUCTION

Pour produire une poudre d'aluminium, nous avons d'abord procédé à la fabrication de copeaux d'Aluminium par tournage. Ainsi, en choisissant des paramètres convenables de tournage comme la vitesse de rotation du mandrin, la vitesse d'avance et la profondeur de la passe, nous avons obtenu des copeaux à la taille et la forme souhaitée. Les copeaux sont ensuite caractérisés par tamisage pour calculer leur diamètre moyen par la formule décrite dans le chapitre précédent. Les résultats de caractérisation sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Refus (gr)	Fraction %
3350	13.5	0.052
2500	17.3	0.069
1600	42.5	0.170
1250	62.0	0.248
850	76.5	0.306
600	26.8	0.107
425	4.9	0.019
assiette	6.1	0.024

**Tableau 5.1 : Résultats de caractérisation des copeaux d'usinage initiaux**  
( $\bar{\phi}_m = 1491.62 \mu\text{m}$ )

### 5.2 BUT DU TRAVAIL

L'opération de broyage a été réalisée dans un broyeur à lames à percussion. Le but de ce travail est d'analyser l'influence des variables de broyage sur les caractéristiques finales de la poudre obtenue. Les variables étudiées sont : Le temps de broyage, la masse broyée ainsi que la vitesse de broyage.

- Les temps de broyage utilisés sont : 30', 1h, 2h, 4h et 8h
- Les masses broyées utilisées sont : 250, 500 et 750 grammes.
- Les vitesses de broyage utilisées sont : 300, 1000 et 2000 tr/min

### 5.3 ELABORATION DE LA POUDRE

La poudre d'aluminium a été élaborée en respectant les variables citées ci-dessus. Une fois produite, elle est caractérisée par tamisage en utilisant la formule (4.1), et la taille moyenne des particules est ainsi déterminée. Les sections ci-dessous

montrent et décrivent l'ordre chronologique suivi pour l'élaboration de cette poudre.

### 5.3.1 Influence du temps de broyage sur la taille moyenne de la poudre:

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\varnothing_m = 1491.62 \mu m$

Vitesse de broyage ( $V_b = 2000$  tr/min)

Masse broyée ( $m = 250$  gr)

Tamis ( $\mu m$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	14.90	05.43
1250	77.30	28.18
850	123.40	44.98
600	21.50	07.83
425	03.40	01.23
300	09.60	03.49
212	02.00	00.72
Assiette	22.20	08.09

**Tableau 5.2 : résultats de caractérisation après un broyage de 30 min**

$D_m = 1046,87 \mu m$

Tamis ( $\mu m$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	13.50	05.41
1250	67.00	26.89
850	108.90	43.71
600	19.80	07.94
425	02.60	01.04
300	07.20	02.89
212	02.20	00.88
Assiette	28.10	11.28

**Tableau 5.3 : résultats de caractérisation après un broyage d'une heure**

$D_m = 1016,27 \mu m$

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	19.10	07.68
1250	62.90	25.29
850	83.30	33.49
600	18.10	07.28
425	02.80	01.12
300	08.00	03.21
212	02.20	00.88
Assiette	52.30	21.03

Tableau 5.4 : résultats de caractérisation après un broyage de 2 heures

$$D_m = 929,61 \mu\text{m}$$

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	24.30	09.73
1250	42.00	16.82
850	74.30	29.75
600	25.40	10.17
425	03.70	01.48
300	07.10	02.84
212	01.90	00.76
Assiette	71.00	28.43

Tableau 5.5 : résultats de caractérisation après un broyage de 4 heures

$$D_m = 831,43 \mu\text{m}$$

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	15.10	06.05
1250	36.30	14.54
850	66.20	26.52
600	37.60	15.06
425	06.00	02.40
300	08.80	02.52
212	02.20	00.88
Assiette	77.40	31.00

Tableau 5.6 : résultats de caractérisation après un broyage de 8 heures

$$D_m = 748,18 \mu\text{m}$$

### 5.3.2 Influence de la vitesse de broyage sur la taille moyenne de la poudre:

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\bar{D}_m = 1491.62 \mu\text{m}$

Masse broyée ( $m=250 \text{ gr}$ )

Temps de broyage ( $t= 1 \text{ heure}$ )

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	49.10	19.69
1250	124.40	49.90
850	64.30	25.79
600	05.70	2.28
425	01.00	0.40
300	01.00	0.40
212	00.28	0.11
Assiette	03.50	1.40

Tableau 5.7 : résultats de caractérisation pour  $V_1 = 300 \text{ tr/min}$

$$\bar{D}_m = 1318.70 \mu\text{m}$$

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	25.40	10.17
1250	77.20	30.91
850	112.10	44.89
600	22.10	8.85
425	01.90	0.76
300	01.50	0.60
212	00.40	0.16
Assiette	09.10	3.64

Tableau 5.8 : résultats de caractérisation pour  $V_2 = 1000 \text{ tr/min}$

$$\bar{D}_m = 1149.03 \mu\text{m}$$

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	13.50	05.41
1250	67.00	26.89
850	108.90	43.71
600	19.80	07.94
425	02.60	01.04
300	07.20	02.89
212	02.20	00.88
Assiette	28.10	11.28

**Tableau 5.9: résultats de caractérisation pour  $V_3=2000\text{tr/min}$**

$$D_m = 1016,27 \mu\text{m}$$

### 5.3.3 Influence de la charge initiale sur la taille moyenne de la poudre:

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\varnothing_m = 1491.62 \mu\text{m}$

Vitesse de broyage ( $V=2000 \text{ tr/min}$ )

Temps du broyage ( $t = 1 \text{ heure}$ )

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	13.50	05.41
1250	67.00	26.89
850	108.90	43.71
600	19.80	07.94
425	02.60	01.04
300	07.20	02.89
212	02.20	00.88
Assiette	28.10	11.28

**Tableau 5.9: résultats de caractérisation pour  $M_1=250 \text{ gr}$**

$$D_m = 1016,27 \mu\text{m}$$

Tamis ( $\mu m$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	40.40	08.08
1250	108.90	21.79
850	204.40	40.90
600	96.60	19.33
425	15.60	03.12
300	09.70	01.94
212	01.30	00.26
Assiette	22.80	04.56

Tableau 5.9: résultats de caractérisation pour  $M_2 = 500$ grs

$$D_m = 1037,90 \mu m$$

Tamis ( $\mu m$ )	Refus (gr)	Fraction %
1600	28.30	03.77
1250	115.20	15.36
850	257.80	34.38
600	236.30	31.51
425	50.50	06.73
300	24.50	03.26
212	02.10	00.28
Assiette	35.10	04.68

Tableau 5.9: résultats de caractérisation pour  $M_3 = 750$  grs

$$D_m = 920.68 \mu m$$

### 5.3.4 Influence des variables de broyage sur les courbes de distribution de taille :

En utilisant les résultats des tableaux ci-dessus, nous montrons l'évolution des caractéristiques de la poudres comme suit :

- Influence du temps de broyage sur la distribution de taille

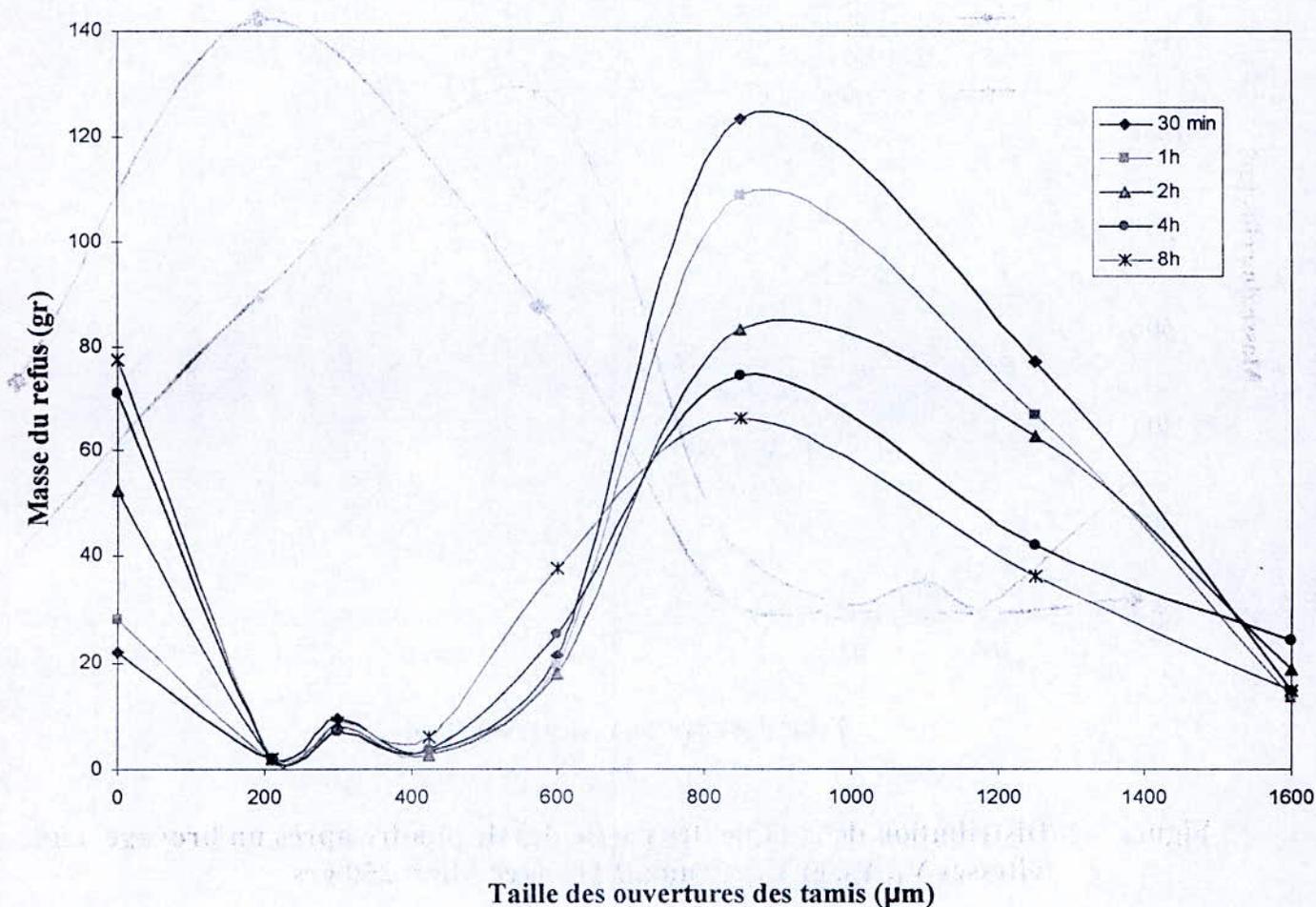


Figure 5.1 : Distribution de la taille des particules de poudre après un broyage de 30' à 8h, :  $V_h = 2000$  tr/min ,  $M_b = 250$  grs

## • Influence de la vitesse de broyage sur la distribution de taille

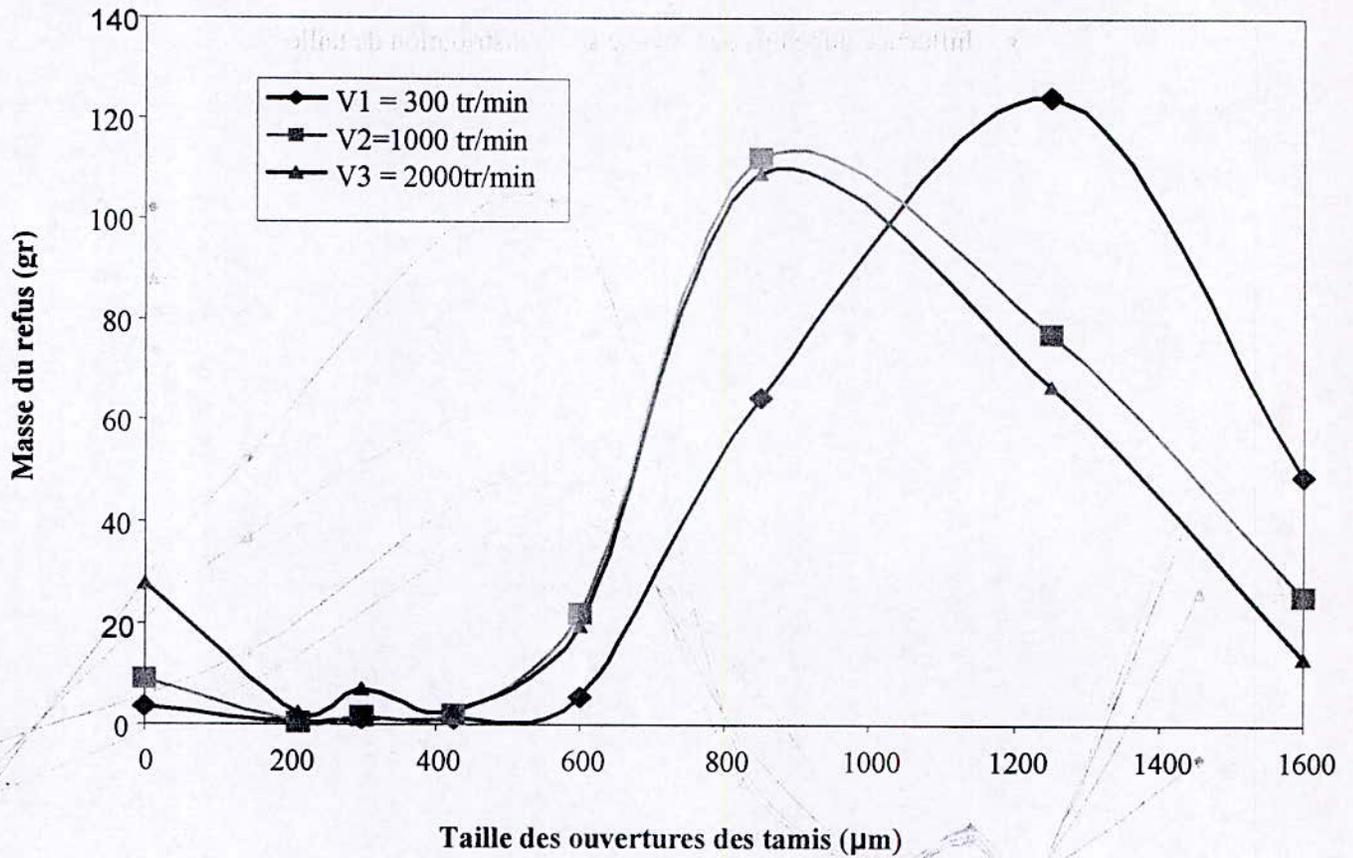


Figure 5.2 Distribution de la taille des particules de poudre après un broyage aux vitesses  $V_1$ ,  $V_2$ , et  $V_3$ . Pendant 1h, avec  $M_b = 250$  grs

- Influence de la masse broyée sur la distribution de taille

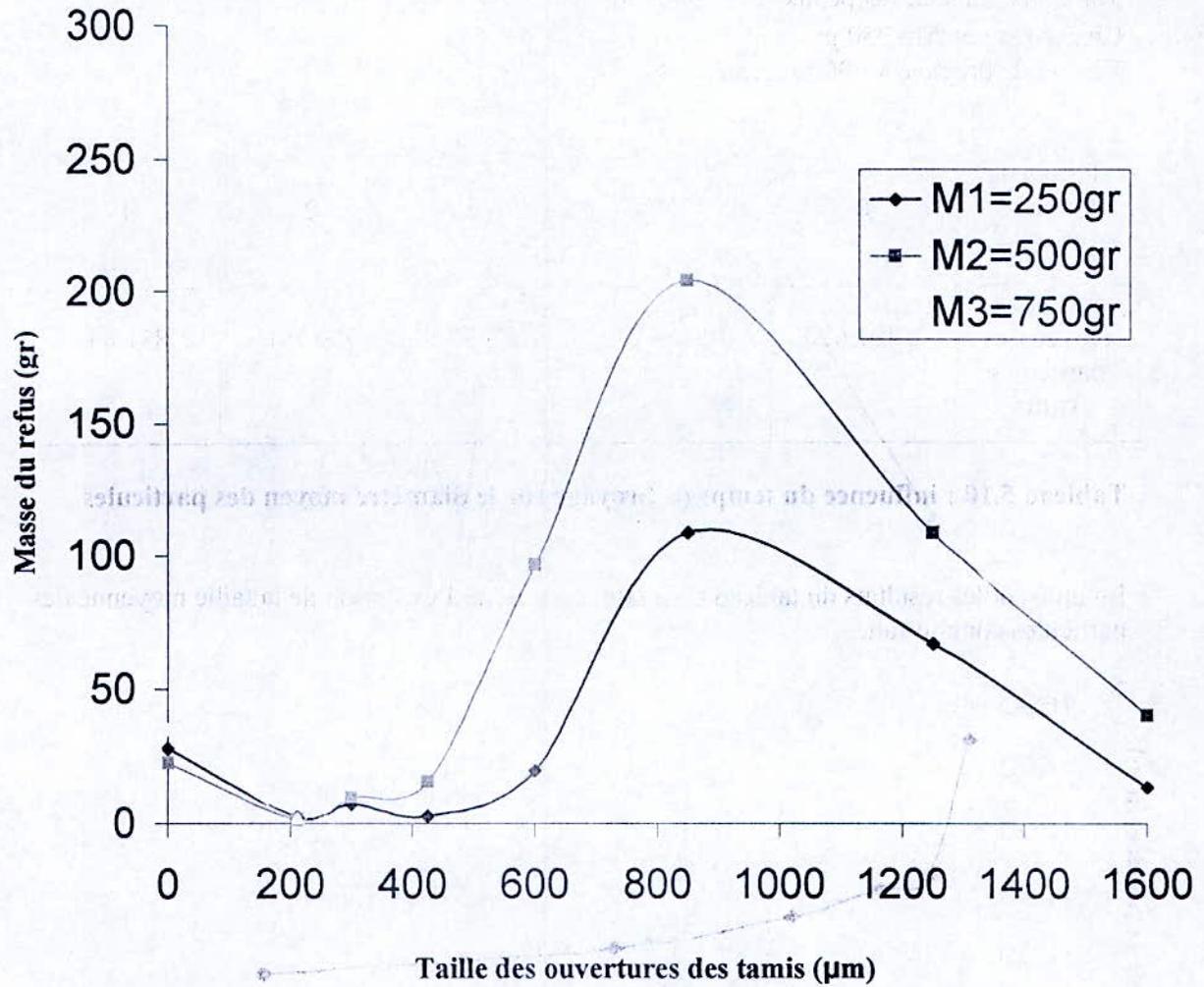


Figure 5.3 Distribution de la taille des particules de poudre après le broyage des Charges  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ , pendant 1h heure avec  $V_b=2000\text{tr/min}$

### 5.4 INFLUENCE DU TEMPS DE BROYAGE SUR LA TAILLE MOYENNE DES PARTICULES:

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\varnothing_m = 1491.62 \mu m$

Charge broyée M= 250 gr

Vitesse de broyage V=2000 tr/min

Temps de broyage (heures)	0	0.5	1	2	4	8
Diamètre moyen des particules ( $\mu m$ )	1491.620	1046.87	1016.27	929.761	831.43	748.18

Tableau 5.10 : influence du temps de broyage sur le diamètre moyen des particules

En utilisant les résultats du tableau ci-dessus, on montre l'évolution de la taille moyenne des particules comme suit.

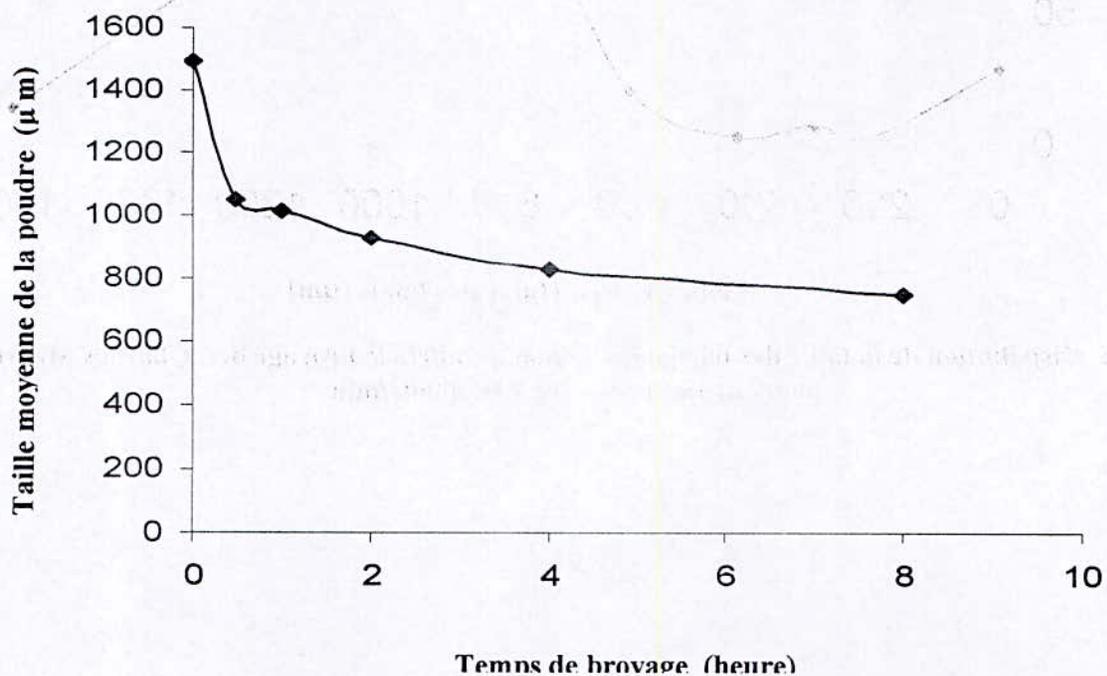


Fig. 5.4 : influence du temps de broyage sur la taille moyenne des particules de poudre

**5.5 : INFLUENCE DU TEMPS DE BROYAGE SUR LA FRACTION FINE :**

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\varnothing_m = 1491.62 \mu m$

Charge broyée  $M = 250 \text{ gr}$

Vitesse de broyage  $V = 2000 \text{ tr/min}$

Temps de broyage (heures)	0.5	1	2	4	8
Fraction fine (grs)	22.2	28.1	52.3	71	77.4

Tableau 5.11 influence du temps de broyage sur la fraction fine

En utilisant les résultats montrés dans le tableau ci-dessus, nous montrons l'évolution de la fraction fine comme suit.

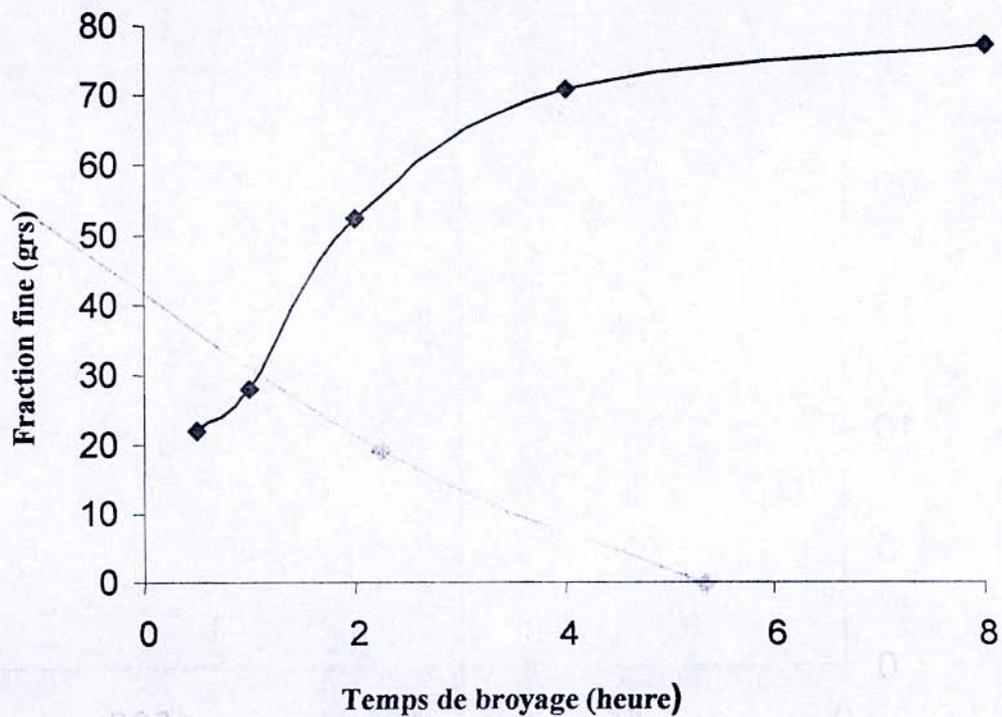


Fig. 5.5 : influence du temps de broyage sur la fraction fine

### 5.6 INFLUENCE DE LA VITESSE DE BROYAGE SUR LA FRACTION FINE :

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\varnothing_m = 1491.62 \mu\text{m}$

Charge broyée  $M = 250 \text{ gr}$

Temps de broyage  $t = 1 \text{ heure}$

Vitesse de broyage (tr/min)	300	1000	2000
Fraction fine (grs)	3.5	9.1	22.2

Tableau 5.12 influence de la vitesse de broyage sur la fraction fine

En utilisant les résultats montrés dans le tableau ci-dessus, nous montrons l'évolution de la fraction fine comme fonction de la vitesse comme suit.

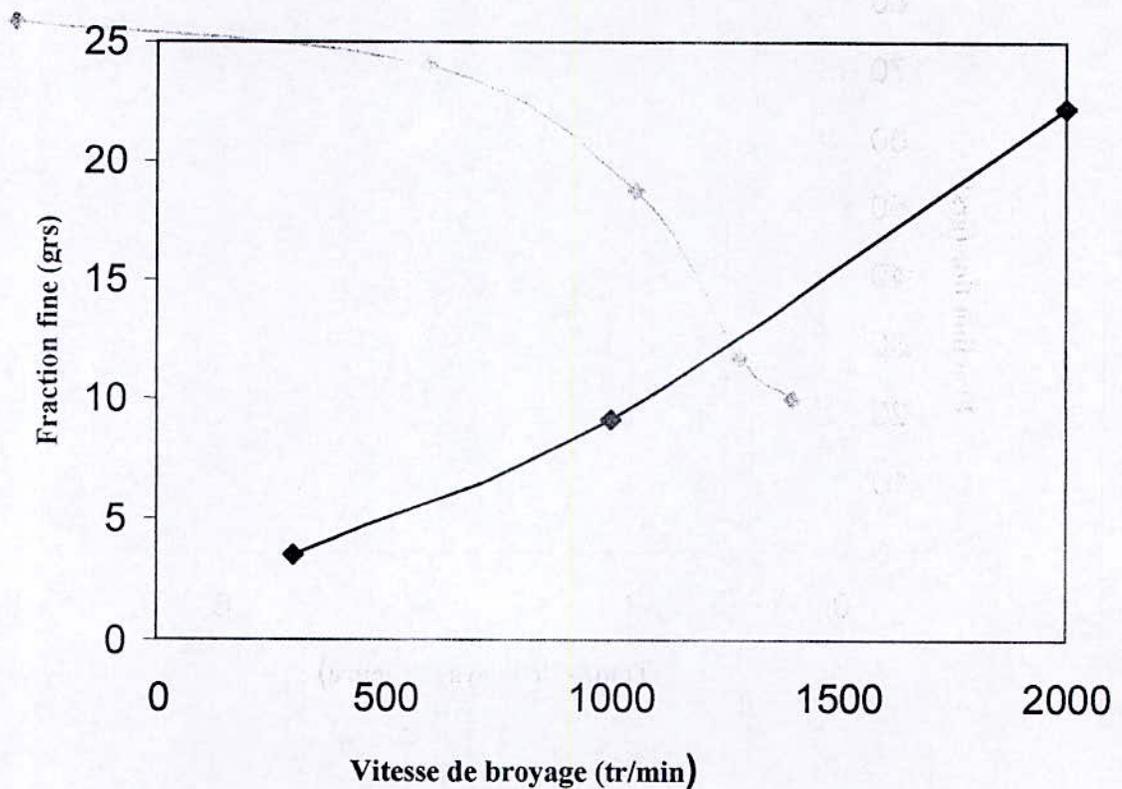


Fig. 5.6 : influence de la vitesse de broyage sur la fraction fine

### 5.7 : INFLUENCE DE LA CHARGE BROYÉE SUR LA FRACTION FINE :

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\phi_m = 1491.62 \mu m$

Vitesse de broyage  $V = 2000 \text{ tr/min}$

Temps de broyage  $t = 1 \text{ heure}$

Charge broyée (grs)	250	500	750
Fraction fine (grs)	22.2	22.8	35.1

Tableau 5.13 : influence de la charge sur la fraction fine

En utilisant les résultats montrés dans le tableau ci-dessus, nous montrons l'évolution de la fraction fine comme fonction de la charge broyée comme suit :

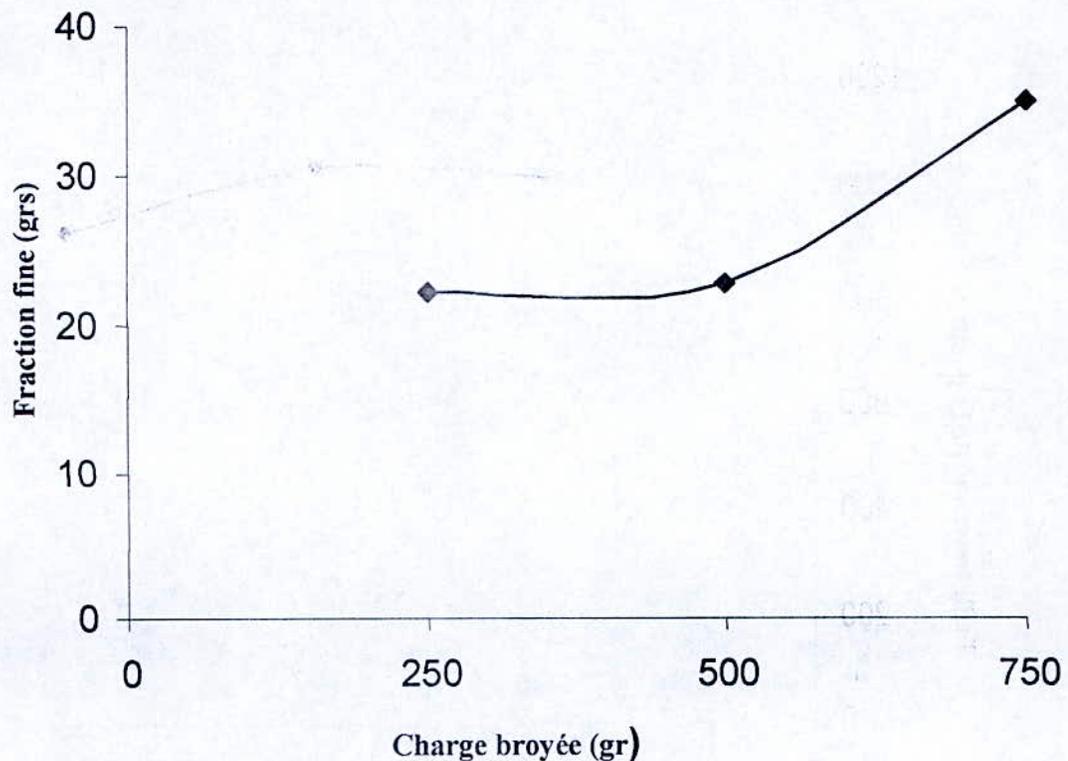


Fig. 5.7 : influence de la charge broyée sur la fraction fine

### 5.8 : INFLUENCE DE CHARGE BROYEE SUR LA TAILLE MOYENNE DES PARTICULES DE POUDRE :

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\varnothing_m = 1491.62 \mu m$

Vitesse de broyage  $V = 2000 \text{ tr/min}$

Temps de broyage  $t = 1 \text{ heure}$

Charges broyée (grs)	250	500	750
Taille moyenne de la poudre ( $\mu m$ )	1016.27	1037.90	920.68

Tableau 5.14 : influence de la charge broyée sur la taille moyenne de la poudre

En utilisant les résultats donnés dans le tableau ci-dessus, nous montrons l'évolution de la taille moyenne des particules de poudre comme fonction de la charge broyée comme suit.

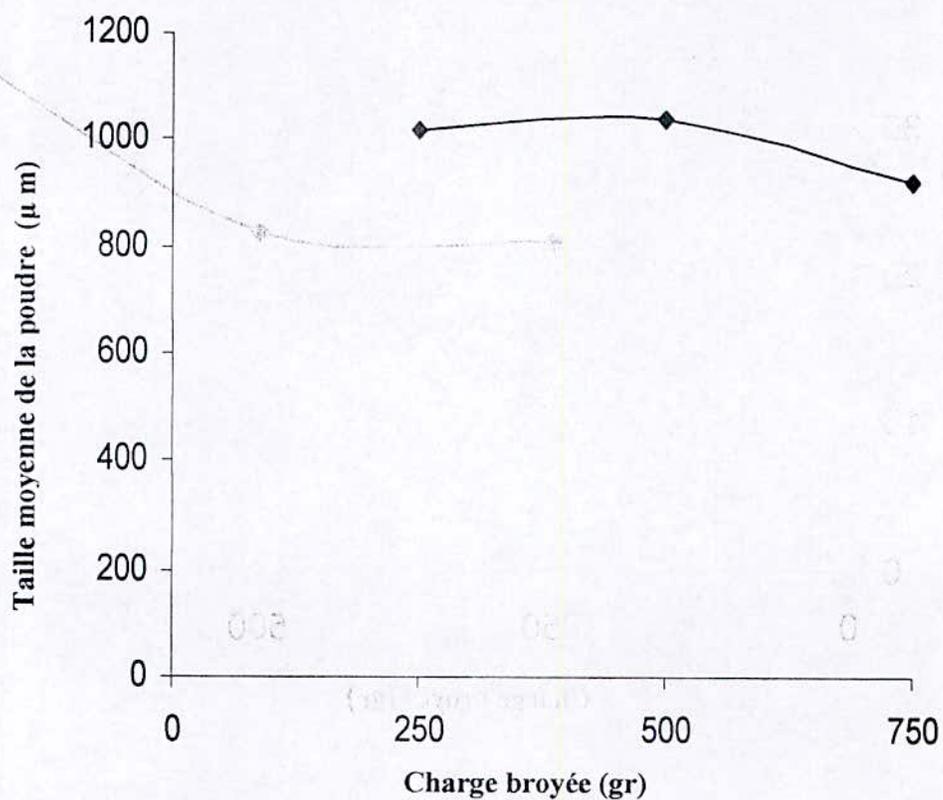


Fig. 5.8 : influence de la charge broyée sur la taille moyenne de la poudre

### 5.9 : INFLUENCE DE LA VITESSE DE BROYAGE SUR LA TAILLE MOYENNE DES PARTICULES DE POUDRE :

- Conditions initiales

Taille moyenne des copeaux  $\varnothing_m = 1491.62 \mu m$

Charge broyée  $M = 250 \text{ gr}$

Temps de broyage  $t = 1 \text{ heure}$

Vitesse de broyage (tr/min)	300	1000	2000
Taille moyenne de la poudre ( $\mu m$ )	1318.70	1149.03	1016.27

Tableau 5.15 : influence de la vitesse de broyage sur la taille moyenne de la poudre

En utilisant les résultats donnés dans le tableau ci-dessus, nous montrons l'évolution de la taille moyenne des particules de poudre comme fonction de la vitesse de broyage comme suit.

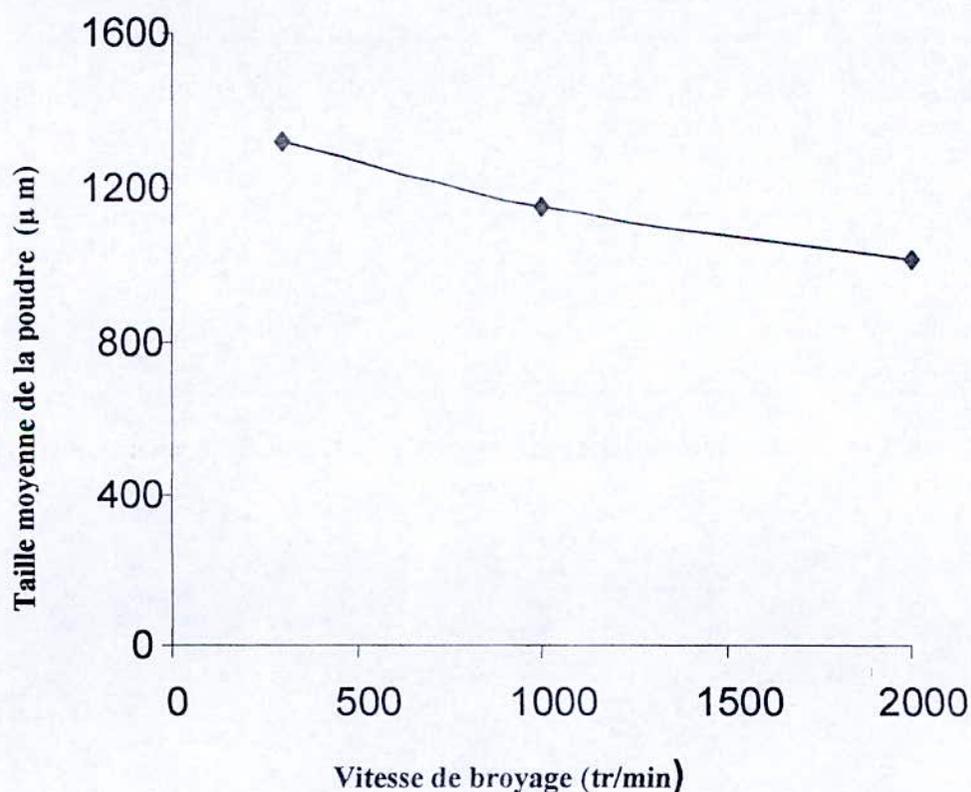


Fig. 5.9 : influence de la vitesse de broyage sur la taille moyenne de la poudre

### 5.10 : COMPARAISON DE L'ALUMINIUM AVEC LE BRONZE ET L'ACIER ELABOREES PAR LE MEME PROCEDE :

#### 5.10.1. Comparaison de la taille moyenne de la poudre en fonction du temps :

- Conditions initiales

Vitesse de broyage  $V=2000\text{tr/min}$

Charge broyée  $M=250\text{gr}$

Temps de broyage  $t=1.2.4. 8$  heures

Taille moyenne des copeaux d'aluminium  $\varnothing_m = 1491.62 \mu\text{m}$

Taille moyenne des copeaux du bronze  $\varnothing_m = 594.97 \mu\text{m}$

Taille moyenne des copeaux d'acier  $\varnothing_m = 600 \mu\text{m}$

Temps de broyage (heure)	0	1	2	4	8
Diamètre moyenne des particules pour l'aluminium ( $\mu\text{m}$ )	1491.62	1016.27	929.61	831.43	748.18
Diamètre moyenne des particules pour le bronze ( $\mu\text{m}$ )	594.97	203.244	181.354	154.206	145.962
Diamètre moyenne des particules pour l'acier ( $\mu\text{m}$ )	600	306.56	283.68	252	225.65

**Tableau 5.16 : Tailles moyennes des poudres d'aluminium du bronze et de l'acier**

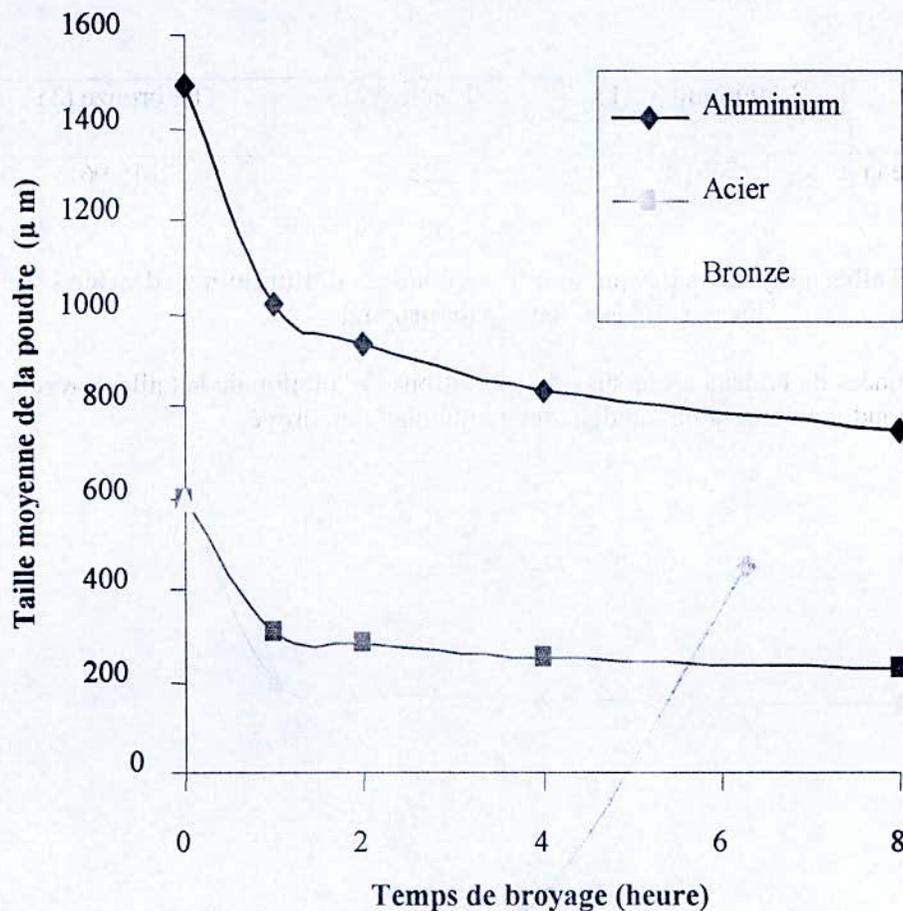


Fig. 5.10 : comparaison entre la taille moyenne des poudres d'aluminium, de bronze et de l'acier

### 5.10.2. Comparaison de la taille moyenne des poudres après un broyage de 8 heures pour les trois métaux:

- Conditions initiales

Vitesse de broyage  $V=2000\text{tr/min}$

Charge broyée  $M=250\text{gr}$

Temps de broyage  $t=8$  heures

Taille moyenne des copeaux d'aluminium  $\varnothing_m = 1491.62 \mu\text{m}$

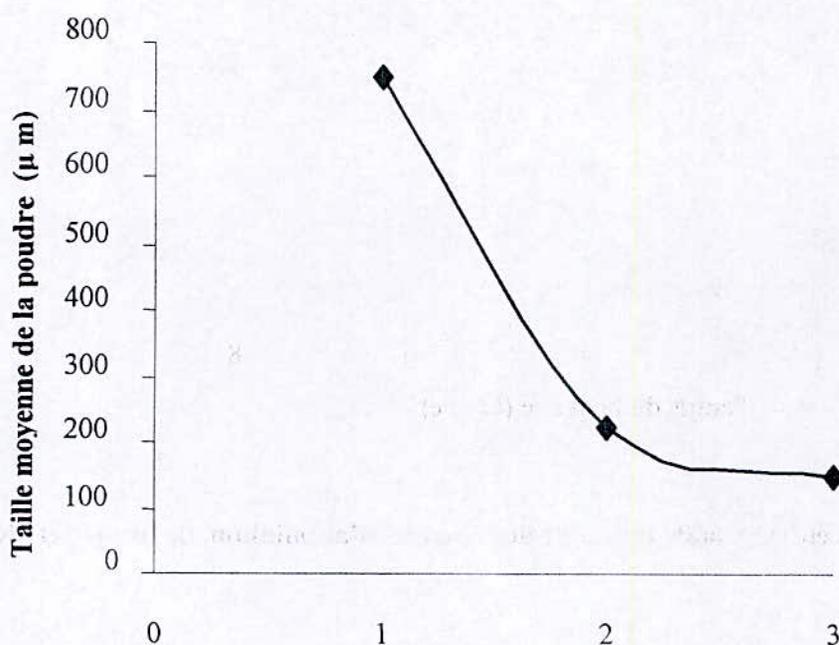
Taille moyenne des copeaux du bronze  $\varnothing_m = 594.97 \mu\text{m}$

Taille moyenne des copeaux d'acier  $\varnothing_m = 600 \mu\text{m}$

Matériau broyé	L'aluminium (1)	L'acier (2)	Le bronze (3)
Taille moyenne de la poudre ( $\mu\text{m}$ )	748.18	225.65	145.96

**Tableau 5.17 : Tailles moyennes des particules de poudres d'aluminium, d'acier et de bronze après 8 heures de broyage**

En utilisant les données du tableau ci-dessus, nous montrons l'évolution de la taille moyenne des particules de poudre comme fonction de la nature du matériau broyé.



Les matériaux dont l'ordre du tableau 5.17

**Fig.5.11. Influence du matériau broyé sur la taille moyenne de la poudre**

### 5.10.3 : Comparaison entre les fractions fines obtenues pour l'aluminium, le bronze et l'acier :

- Conditions initiales

Vitesse de broyage  $V=2000\text{tr/min}$

Charge broyée  $M=250\text{gr}$

Temps de broyage  $t=1\text{h}, 2\text{h}, 4\text{h}, \text{et } 8\text{ heures}$

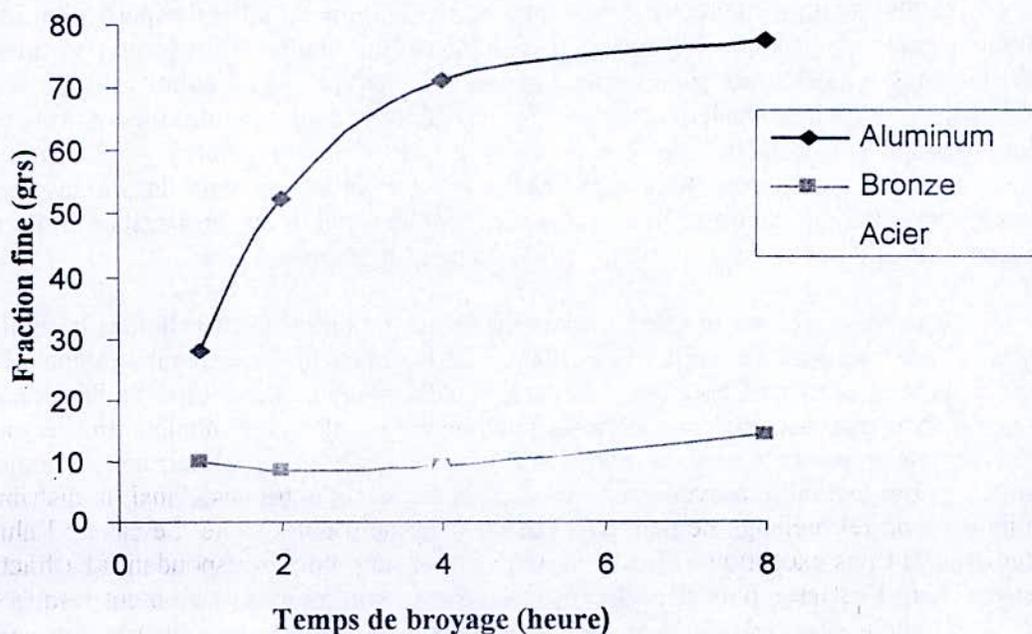
Taille moyenne des copeaux d'aluminium  $\varnothing_m = 1491.62 \mu\text{m}$

Taille moyenne des copeaux de bronze  $\varnothing_m = 594.97 \mu\text{m}$

Taille moyenne des copeaux d'acier  $\varnothing_m = 600 \mu\text{m}$

	Masse de la fraction fine (grs)			
	1 heure	2 heures	4 heures	8 heures
aluminium	28.1	52.3	71	77.4
bronze	10.1	8.3	9.2	14.2
acier	3.5	4.7	9.5	23.6

**Tableau 5.18 : Evolution de la fraction fine en fonction du temps pour les trois matériaux**



**Fig. 5.12. Évolution de la fraction fine en fonction du temps des trois matériaux**

## CHAPITRE : 7

### DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

#### 1. Introduction

L'essentiel de notre travail consiste à établir puis à comprendre l'effet des facteurs régissant les mécanismes impliqués lors d'une expérience de broyage mécanique à percussion des copeaux d'usinage d'aluminium. Pour ce faire, trois facteurs ont été étudiés : Le temps de broyage, la masse initiale broyée et la vitesse de broyage.

Le principe de la pulvérisation de la matière par ce procédé est basé sur la désintégration des copeaux d'usinage d'aluminium en fines particules, quand ils sont cisailés puis projetés à grande vitesse contre une cible fixe. La probabilité de désintégration est d'autant plus grande que le matériau broyé subit un écrouissage continu le rendant plus dur, plus fragile et donc friable. Le taux d'écrouissage qui est déterminant dans cette expérience, est contrôlé par les facteurs de broyage qui font l'objet de cette étude ainsi que les caractéristiques physiques et mécaniques de la matière broyée. Dans ce chapitre, nous allons proposer l'analyse individuelle de l'effet de chaque facteur sur les propriétés de la poudre obtenue, puis une corrélation entre la taille et le paramètre responsable dans la formation de cette taille. Finalement une équation paramétrique reliant l'ensemble des paramètres étudiés est présentée en guise de résultat final du processus du broyage.

#### 2. Influence du temps de broyage :

Le but de toute opération de broyage est de diminuer la taille des particules à un degré minimal mais contrôlable. Cependant, il faut savoir que durant le broyage il se produit des phénomènes indésirables et inverses au but recherché par l'action de broyage. Ses phénomènes sont principalement le soudage à froid et l'agglomération des particules. L'un des principaux paramètres de broyage est le temps. Pour étudier son action sur la désintégration des copeaux, nous avons choisi un intervalle contenant des durées de broyage comprises entre une heure et huit heures. Les résultats montrant la distribution de taille en fonction de la durée de broyage, sont montés dans les figures (5.1 à 5.4).

Il faut d'abord noter que toutes ces courbes montrant la distribution de taille ont la même allure : c'est-à-dire celle d'une cloche. Ces courbes en forme parabolique ou de cloche sont caractéristiques pour tous les matériaux sous forme de poudre. En effet dans un amas de poudre on trouve toujours une certaine fraction de poudre extrêmement fine et une autre relativement grossière. Ces deux fractions sont souvent de même valeur, mais la majorité des particules ont une taille moyenne comprise entre ces deux extrêmes. Ainsi, la distribution de taille pour un tel mélange ne peut être que sous forme d'une cloche. Le cas de l'aluminium étudié ne fait pas exception. Elles commencent par un point correspondant à la fraction fine retenue dans l'assiette, puis elles descendent vers un minimum puis montent jusqu'à un petit pic. Finalement elles redescendent pour se stabiliser à la fin vers une distribution gaussienne ou normale. Il faut noter aussi que ces courbes se divisent en deux parties. Dans la première, la fraction de la poudre retenue dans un tamis de granulométrie inférieure à la taille moyenne de la poudre produite, augmente suivant l'ordre croissant du temps de broyage. Par contre dans la deuxième, l'ordre s'inverse. Les minimums représentent les fractions de poudre qui se trouvent retenues dans les tamis d'ouverture (212  $\mu\text{m}$  et 425  $\mu\text{m}$ ) d'une part, et le petit pic correspond à une fraction de poudre retenue dans le tamis d'ouverture (300  $\mu\text{m}$ ).

Ces minimums représentent généralement des fractions de poudre très faibles, surtout si le nombre de tamis utilisé est grand. Le maximum de la courbe représente la plus grande fraction de poudre retenue dans un tamis. Cette fraction représente généralement la taille moyenne de la poudre. Si la caractérisation est bonne, cette fraction doit se trouver dans un tamis d'ouverture moyenne, se trouvant au milieu de la série des tamis choisis. Les particules qui ont cette taille représentent la majorité dans une masse de poudre donnée, et elles influent proportionnellement sur la taille moyenne de toute la masse de poudre.

La figure 5.1 montre ce type de distribution, malgré quelques différences dues notamment aux phénomènes d'agglomération qui se produisent pendant le tamisage. Les fractions de poudre grossière (1600  $\mu\text{m}$ ) diminuent avec le temps de broyage, et les fractions de poudre fine (<212  $\mu\text{m}$ ) augmentent avec l'augmentation du temps de broyage. Les fractions moyennes ( $\approx 850 \mu\text{m}$ ) représentant la majorité de la population de poudre, augmentent avec l'augmentation du temps de broyage.

On remarque par ailleurs aussi, que quelque soit le temps de broyage des copeaux, la distribution de taille présente toujours un petit pic au niveau du tamis de (300  $\mu\text{m}$ ). Ceci ne peut être expliqué que par l'agglomération. En effet pour des raisons locales et propres à certaines particules, celles-ci s'agglomèrent et forment des agrégats plus gros qui ne passent pas à travers les ouvertures. Par ailleurs ces agrégats s'ils sont très gros peuvent empêcher les fines particules de passer à travers les ouvertures de ce tamis causant ainsi les inconvénients observés. Il convient de préciser également qu'à cause du frottement superficiel par attrition entre les particules, celles-ci deviennent chargées électrostatiquement ce qui provoque leur attraction mutuelle, d'où l'agglomération détectée au niveau de ce tamis en particulier. En effet, de fines particules peuvent s'agglomérer entre elles formant le plus souvent de petites boules qui bloquent les ouvertures des tamis, comme elles peuvent également s'attacher à des particules rugueuses plus grosses qu'elles causant le même effet.

La figure 5.4 illustre l'influence du temps sur le diamètre moyen des particules de poudre. On remarque d'après cette courbe que les particules décroissent en taille très rapidement durant l'intervalle de temps compris entre une demi heure et une heure de broyage. La taille moyenne des particules diminue de 1491.62  $\mu\text{m}$  qui est la taille moyenne initiale des copeaux jusqu'à une taille de 1046.87  $\mu\text{m}$ . Cependant, on peut dire que cette courbe se divise en deux parties. La première partie montre la diminution brutale de la taille durant une courte durée de broyage (30 minutes). Cette diminution est de l'ordre de 450 microns. Dans cet intervalle de temps compris entre 0 et 30 minutes, la courbe est une droite caractérisée par une grande pente. La seconde partie de la courbe correspond à un broyage prolongé, dont l'intervalle de temps est compris entre 30 minutes et 8 heures. Ici, la courbe présente une très faible pente. La droite de plus grande pente (0-30 minutes) exprime la diminution de taille obtenue durant le premier mécanisme de broyage qui opère dans ce broyeur. Ce mécanisme ne peut être que le cisaillement. En effet, au début du broyage les copeaux sont cisailés à grande vitesse par les outils mobiles contre les outils fixes. Ceci parce que au début, les copeaux ont une taille suffisamment grande que l'écartement entre les outils. Par contre dans la deuxième partie de la courbe, la taille des particules de poudre diminue lentement avec le temps de broyage. Ceci est dû au fait que le mécanisme de cisaillement n'est plus dominant dans cette période. Effectivement, après une demi heure de broyage c'est la percussion et l'attrition qui prennent leur place de dominance. Quand les copeaux sont percutés à grande vitesse contre les outils fixes et les parois de la chambre, avec le temps, ce travail donne naissance à l'écrasement des copeaux. Cet écrasement est le résultat de l'augmentation de la densité de dislocation qui à son tour produit la fragilisation des copeaux. Lorsque la densité de dislocation atteint un seuil critique, il y a initiation puis

croissance des fissures à l'intérieur des copeaux, ce qui provoque et conduit ultérieurement vers désintégration. Ce résultat est confirmé par la théorie de Griffith sur la fracture fragile rapportée en détail dans le chapitre I de cette thèse.

L'attrition est également un des mécanisme les plus important dans cette partie. Elle se caractérise par la formation de fines particules dues aux frottements et à l'usure des particules les unes contre les autres et avec les parois de la chambre. Ceci provoque l'effet d'écaillage. L'écaillage est la formation sur la surface des grosses particules mères de petits flocons qui se détachent quand les conditions sont réunies. Le mélange de ces écailles avec le reste des particules provoque une diminution de la taille moyenne de la poudre, jusqu'à une taille minimale qui reste constante dans le temps. La courbe 5.4 représente l'influence du temps de broyage sur la taille moyenne de la poudre d'aluminium obtenue par broyage à percussion. Il est important de rapporter la similitude de celle-ci avec la courbe de la figure 1.4 obtenue pour le fer électrolytique broyé dans un broyeur à vibration à boulets Megapact. D'après la figure 5.4 l'influence du temps de broyage sur la taille moyenne des particules obéit à l'équation suivante :

$$\varnothing_m \approx t^{-p}$$

Où :

$\varnothing_m$  : est le diamètre moyen des particules de poudre.

t : est le temps de broyage.

p : est la pente de la droite décroissante.

### 3. Influence de la vitesse de broyage :

La figure 5.9 montre l'influence de la vitesse sur la taille moyenne des particules de poudre obtenues. Pour mettre en évidence l'influence de ce paramètre sur la taille moyenne de la poudre, trois vitesses différentes et croissantes ont été utilisées : Elles ont pour valeurs 300, 1000 et 2000 tr/min. Cette variation est obtenue grâce à un variateur de vitesse. Au cours de cette expérience la charge broyée et le temps de broyage sont maintenus constants et égaux respectivement à 250 grammes et 8 heures.

La courbe de cette figure montre que la taille des particules diminue en augmentant la vitesse de broyage. Quand la roue porte-outils tourne à une vitesse plus faible, les copeaux sont moins sollicités par les lames du broyeur. De ce fait, ils sont moins percutés et moins cisailés. Comme le mécanisme de cisaillement est moins privilégié, les autres mécanismes aussi sont moins importants car les particules ne sont plus projetées avec la même la force contre les parois et les outils fixes. Par voie de conséquence, il y'a moins de frottement et d'usure. Cela implique que l'énergie nécessaire pour l'initiation des fissures et leur croissance à l'intérieur des copeaux n'est pas atteinte. Et pour atteindre la valeur de cette énergie il faut augmenter la vitesse de broyage pour donner lieu à la percussion. A partir de cette courbe, on constate que la taille moyenne diminue brutalement en augmentant la vitesse pour avoir une allure d'une droite de pente q. D'après cette courbe, l'influence de la vitesse sur la taille moyenne des particules de poudre est décrite par l'équation paramétrique suivante :

$$\varnothing_m \approx V^{-q}$$

Où :

q : est la pente de la droite décroissante.

V : la vitesse de rotation des outils (trs/min).

#### 4. influence de la charge broyée :

Pour mettre en évidence l'influence de la charge broyée sur la taille moyenne de la poudre, l'opération de broyage a été réalisée en variant cette charge de 250, 500 et 750 grammes. Lors de cette opération la vitesse et le temps de broyage sont maintenus constants et égaux à 2000 tr/min et une heure respectivement.

A partir des résultats obtenus et montrés à la figure 5.8, on remarque que la taille moyenne des particules de poudre d'aluminium augmente entre les charges de 250 et 500 grammes. Au-delà de 750 grammes la taille diminue modestement. L'explication possible de ce comportement aussi minime soit-il ( $21,5 \mu\text{m}$ ), est peut être due en premier lieu au phénomène d'agglomération qui se produit entre les particules quand elles deviennent chargées électrostatiquement. D'où une attraction entre elles, et par voie de conséquence elles restent dans les tamis d'ouverture qui ne leur correspondent pas.

En ce qui concerne la masse de 750 grammes, la taille des particules de poudre obtenues correspondante est inférieure à celle des charges de 250 et 500 grammes. Ceci peut être expliqué par le fait que le phénomène plus dominant dans cette opération est l'attrition. En effet l'action de l'attrition est proportionnelle à la charge à cause de la grande surface spécifique des copeaux initiaux. Malgré un temps de broyage plus petit (1 heure), vue la masse importante de la charge, par rapport au volume de la chambre du broyeur, il y aura beaucoup plus de friction et de frottement entre les copeaux les uns contre les autres, et avec les parois de la chambre. La conjugaison de tous ces phénomènes a pour résultat une poudre de taille moyenne des particules plus fine. Ce résultat est compatible avec la distribution de tailles montrées sur les courbes de la figure 5.3, vu que le pic de la fraction fine pour la charge de 750 grammes se trouve à gauche des autres pics correspondants aux autres charges. En effet, le déplacement à gauche de la courbe ne peut être expliqué que par l'augmentation de la fraction fine qui influe directement sur la taille moyenne. C'est-à-dire la majorité des particules moyennes pour cette charge sont de taille inférieure à celle des particules moyennes pour les charges de 250 et 500 grammes.

#### 5. Evolution de la fraction fine :

La fraction fine représente la masse de particules dont la taille est inférieure à la plus petite ouverture de tamis ( $212 \mu\text{m}$  dans notre cas). Cette fraction est récupérée dans l'assiette. Son étude est très importante car elle détermine le rendement de production d'une poudre de taille très fine par un broyeur donné. Cette fraction dont la taille des particules est très fine, est particulièrement recherchée dans certaines applications industrielles comme : l'industrie chimique, mécanique et électronique. Pour cette raison, l'évolution de cette fraction, a fait l'objet d'une étude en fonction des trois facteurs de broyage étudiés que sont : le temps, la vitesse, ainsi que la charge broyée.

##### 5.1 Influence du temps de broyage sur la fraction fine:

En se référant, à la figure (5.5), qui montre l'évolution de la fraction fine, on remarque qu'elle est proportionnelle au temps de broyage. On remarque également que pour le cas de l'aluminium, la fraction augmente brutalement dans l'intervalle de temps compris entre 30 minutes et 4 heures. Cette fraction passe de 22.2 à 71 grammes. Il faut préciser ici que la fraction fine est dépendante de tous les mécanismes de broyage sans exception. Le cisaillement, la percussion ainsi que l'attrition participent tous, mais à des degrés différents à améliorer la quantité de cette fraction fine. Pendant l'intervalle de temps compris entre 4 et 8

heures, la courbe se caractérise par une faible pente. Cela veut dire que la production par écaillage des particules fines, baisse dans l'intervalle suscitée. Cependant, si l'écaillage est le résultat de l'écroutissage dû à la déformation plastique à froid, on devrait s'attendre tout naturellement à ce que cette fraction augmente continuellement avec le temps. Donc le changement de pente de la dite courbe et sa tendance vers une forme plutôt parabolique aux temps larges, n'est rien d'autre que l'effet de l'agglomération qui encore une fois, provoque l'obstruction des tamis, empêchant ainsi les particules fines de voyager jusqu'à leur destination finale : c'est-à-dire l'assiette. Ces résultats sont confirmés par les travaux réalisés antérieurement par Ourahmoune [10] et Amar [24].

### 5.2 Influence de la masse initiale des copeaux :

La figure (5.7) représente l'influence de la charge broyée sur la fraction fine de la poudre. On constate d'après cette figure que la fraction fine augmente avec la masse initiale des copeaux broyés. Ceci est expliqué, par le fait que la quantité des écailles qui constituent la majeure partie de la fraction fine, augmente avec l'augmentation de la quantité initiale des copeaux broyés. Sachant que l'écaillage est le résultat direct de l'attrition, donc du frottement inter particules, on peut donc dire sans risque de se tromper que plus le nombre initiales des particules broyées est grand, plus le nombre d'écailles qui se détachent de leur surface écroûe est grand également. D'où l'augmentation de la fraction fine observée.

### 5.3 Influence de la vitesse sur la fraction fine :

La figure 5.6 montre l'influence de la vitesse de broyage sur la masse de la fraction fine. Il faut noter que cette fraction est très dépendante de la vitesse de broyage. Pour mettre en évidence l'effet de cette variable, trois vitesses de rotation des outils ont été choisies : Une vitesse minimale égale à 300 trs/min, une vitesse moyenne égale à 1000 trs/min et une vitesse maximale possible égale à 2000 trs/min. De la courbe, on constate que pour la vitesse minimale la fraction fine est négligeable. Elle n'est que de l'ordre de 3,5 grammes. Evidemment à cette vitesse, le nombre de cycles de cisaillement, de percussion ou de frottement subis par un copeau, est très petit. Par conséquent, la division granulométrique, l'écroutissage ainsi que la fatigue du métal sont substantiellement réduits, d'où la faiblesse de la fraction fine à cette vitesse. A mesure que la vitesse augmente, tous les phénomènes cités ci-dessus sont inversés. L'écroutissage augmente, la dureté augmente, et la résilience diminue. Ainsi, les copeaux devenus suffisamment fragiles se désintègrent plus facilement, ce qui conduit tout naturellement à une taille moyenne fine et une fraction fine plus grande. Par comparaison à la vitesse minimale où la fraction fine n'était que de 3,5 grammes, la fraction fine obtenue à la vitesse maximale (2000 trs/min) a augmenté de presque 8 fois pour atteindre une masse de 28.1 grammes. Donc en conclusion, pour un temps fixe et pour une masse initiale donnée, pour avoir une fraction fine optimale, il est nécessaire d'utiliser une vitesse maximale.

## 6. Comparaison des résultats obtenus avec le bronze et l'acier :

La figure 5.10 illustre l'évolution du diamètre moyen des particules en fonction du temps de broyage pour l'aluminium, l'acier, et le bronze sous les mêmes conditions de broyage. Les trois métaux, sont broyés pendant 8 heures avec une vitesse maximale de 2000 tr/min. La taille moyenne des copeaux initiaux pour ces trois matériaux sont respectivement : 1491.62 600 et 595  $\mu\text{m}$ . Comme il a été montré auparavant par Ourahmoune [10] que la taille

initiale des copeaux n'influe pas sur la taille des particules du produit broyé, il est donc tout à fait permis de comparer le comportement de ces trois métaux même si leurs copeaux initiaux ont des tailles différentes. Tout d'abord on remarque que les trois courbes ont la même allure, ce qui signifie peut être que les mécanismes de rupture qui opèrent dans les trois métaux sont les mêmes. Ainsi, placés dans les mêmes conditions de broyage, le bronze s'effrite plus facilement que l'acier et l'aluminium. On sait que ce dernier est connu par sa faible densité et par sa grande ductilité par rapport aux bronzes et l'acier. Ceci peut se vérifier dans l'usinage des trois matériaux. Le bronze s'usine facilement en donnant des copeaux discontinus et fins tandis que l'aluminium donne des copeaux plutôt continus et relativement grossiers pour les mêmes conditions d'usinage. Quant à l'acier, il présente des propriétés médianes par rapport aux deux autres métaux. Il est plus ductile que le bronze cela est vérifié par Amar [24]. Cette observation nous permet de dire que le bronze et l'acier sont les matériaux les plus fragiles donc plus susceptibles à l'action du broyage que l'aluminium, d'où la position des courbes de la figure (5.10).

La figure 5.12 illustre l'évolution de la fraction fine en fonction du temps. Cette fraction est proportionnelle à cette variable pour les trois matériaux. Il faut noter que la fraction fine est plus grande quantitativement pour l'aluminium pendant le broyage. Pour les trois premières heures de broyage, la fraction fine du bronze est nettement supérieure à celle de l'acier, ceci est dû à la perte et l'agglomération, et au delà de ce temps, le comportement est inversé. Cependant, pour un broyage de 8 heures la fraction fine est plus grande lors du broyage de l'aluminium, puis de l'acier et finalement du bronze. Concernant la taille des particules de poudre, celle-ci est plus fine pour le cas du bronze, moyenne pour l'acier et relativement grossière pour l'aluminium. En conclusion, comme les courbes sont parallèles, alors la plus basse représente le matériau plus dur et fragile, et la plus haute représente le matériau le plus ductile.

## 7. Influence des variables de broyage sur la morphologie des particules de poudre:

### 7.1 Morphologie du copeau initial

La majorité des copeaux initiaux utilisés pour le broyage, ont une forme irrégulière plus ou moins allongée. Ils peuvent être soit rectiligne ou sous forme d'un arc. Les formes typiques des copeaux d'aluminium obtenus par usinage, à l'aide d'un tour représentant la majorité d'entre eux sont montrées dans la photomicrographie de la figure (6.1) ci-dessous :

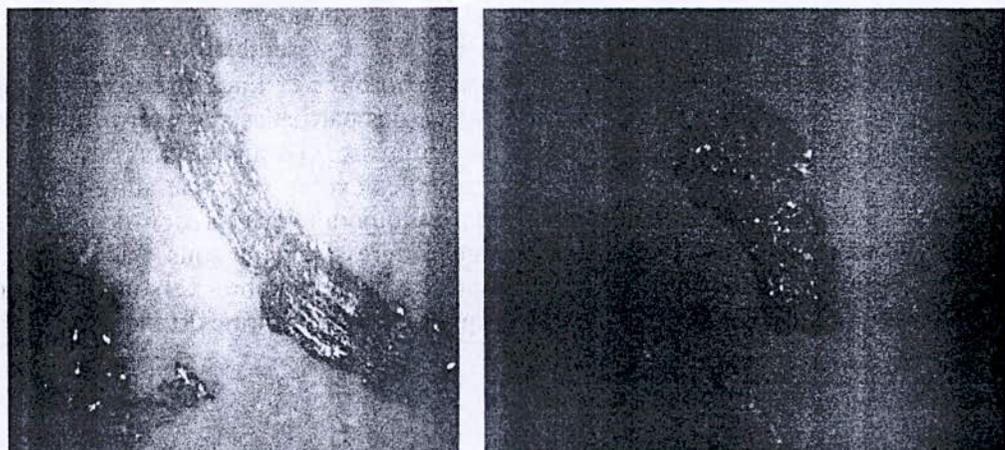


Figure 6.1 : photomicrographie optique montrant la forme initiale des copeaux utilisés. G =100 X

Comme le montre la figure ci dessus, la surface est rugueuse, et présente des dents de scie. D'après cette photographie, le matériau est prédisposé à se fracasser dès l'application d'une contrainte. En effet le genre de déformation plastique subie par les copeaux durant l'usinage fait que ceux-ci sont fissurés presque sur toute leur surface externe, ce qui les rend facilement cassant entre les doigts. Ce constat est révélé par la désintégration rapide observée durant la première heure de broyage comme déjà indiqué auparavant.

## 7.2 Evolution morphologique des particules de poudre pendant le broyage :

Au début du broyage, les copeaux d'aluminium subissent une désintégration rapide, due au mécanisme régi principalement par le cisaillement. Durant cette période, la taille moyenne des particules change rapidement, tandis que la forme évolue lentement depuis la forme irrégulière initiale des copeaux, vers une forme transitoire celle d'un grain à café. Ce type de forme est montré sur la photomicrographie optique de la figure 6.2



Figure 6.2 : Photomicrographie optique, montrant l'évolution morphologique des particules de poudre vers une forme de grain à café. G =100 X

Cette morphologie est typique pour les poudres obtenues par broyage mécanique utilisant le broyeur à percussion à lames. Elle est semblable aux formes rapportées par Ourahmoune [10] et par Amar [24] pour le bronze et l'acier respectivement. Cette forme transitoire est due à la déformation plastique des particules par micro-forgeage à froid. Et au fur et à mesure que le temps de broyage progresse, et sous l'action des contraintes sous des angles différents, la morphologie des particules évolue vers une autre forme intermédiaire : celle d'un beignet. Durant son évolution, et toujours sous l'action des contraintes dues à la percussion, la forme de beignet change progressivement sous l'action des chocs et des frottements entre les outils et le font circulaire de la chambre, vers une forme plus nodulaire, puis à une forme plus arrondie et quasi sphérique. Cette forme est montrée dans la figure (6.3) ci-dessous.

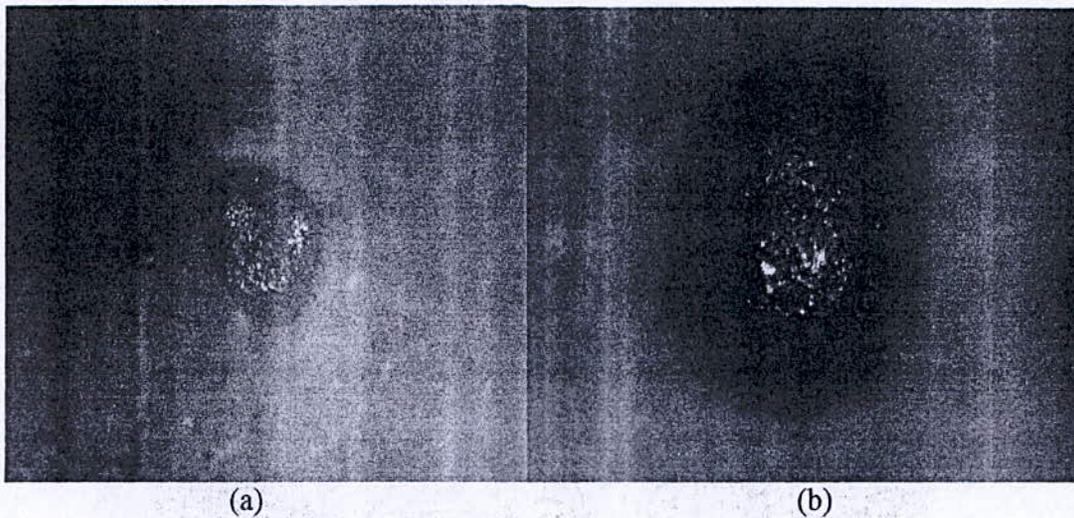


Figure 6.3 : Photomicrographie optique montrant (a) une forme nodulaire et (b) une forme quasi sphérique évoluée des particules de poudre pendant un broyage de 8 heures.  
G = 100 X

Durant une opération de broyage mécanique, à percussion, on sait que les mécanismes principaux qui mènent à la fracture fragile, et ceux qui régissent les changements structuraux des particules sont principalement, le cisaillement, la percussion et l'attrition. Ces trois mécanismes induisent forcément un écrouissage important aux particules broyées. Lorsque l'énergie nécessaire pour l'initiation des fissures et leur croissance à l'intérieur des copeaux est atteinte, les fissures se propagent facilement dans le matériau écroui, ce qui provoque une fracture par la suite pour donner naissance à une autre particule. Ce phénomène d'initiation des fissures est illustré dans la figure (6.4) ci-dessous.

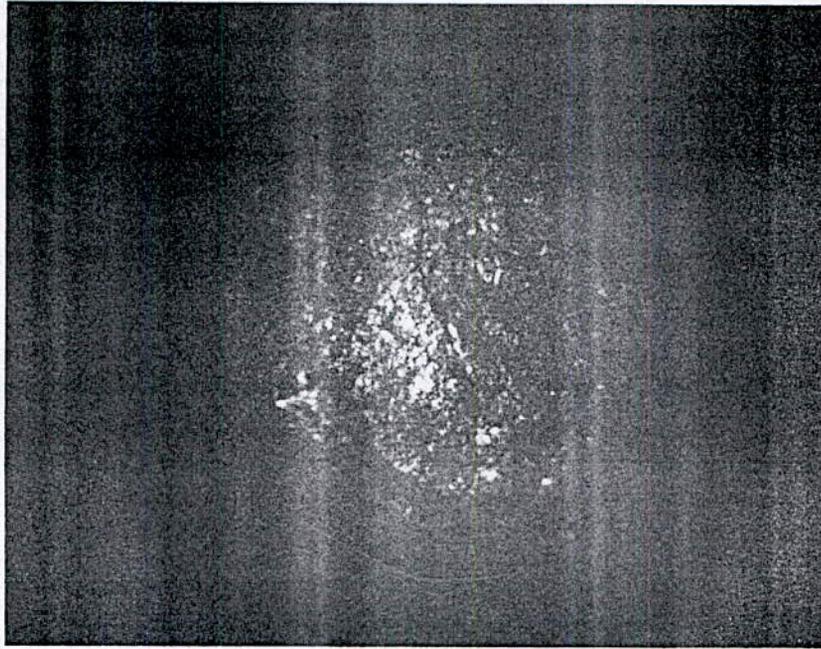
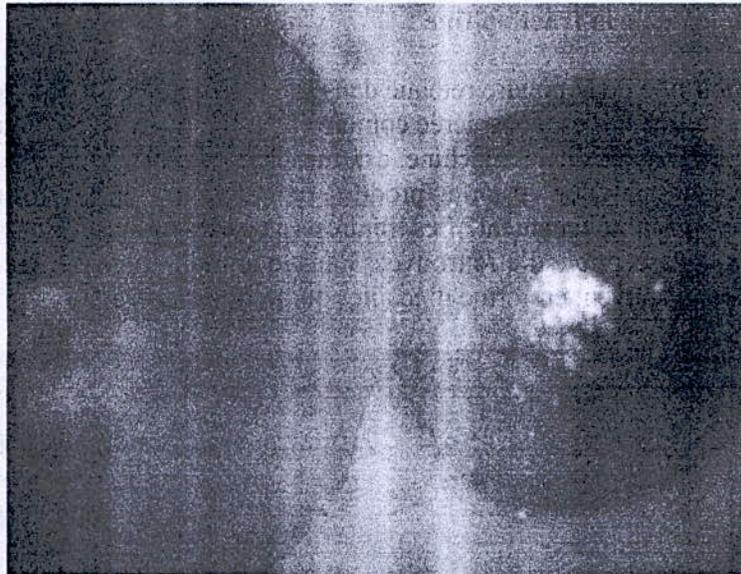


Figure 6.4 : photomicrographie optique montrant initiation d'une fissure sur la particules pendant un broyage de 4 heures.  $G = 100 X$

### 7.3 Agglomération pendant le broyage.

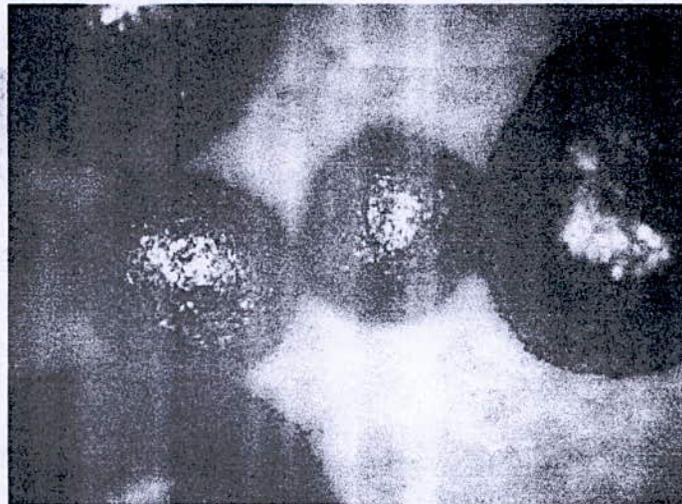
Pendant le broyage et tamisage des poudres, les particules obtenues par ce type de broyage subissent un frottement superficiel excessif. En conséquence, les particules deviennent chargées électrostatiquement, conduisant à une attraction mutuelle entre elles. Cette attraction conduit à une agglomération de plusieurs particules entre elles formant un aggloméré individuel ou un réseau d'aggloméré. Ce phénomène peut être observé dans la figure (6.5a) et (6.5b).

Dans les figures ci-dessous on constate un nuage de particules fines qui se collent sur la surface des grosses particules.



(a)

Figure (6.5a) : Photomicrographie optique montrant un phénomène d'agglomération sous forme d'un aggloméré individuel pendant un broyage de 4 heures.  $G = 100 X$ .



(b)

Figure. (6.5b) : Photomicrographie optique montrant le phénomène d'agglomération sous forme d'un aggloméré multiple pendant un broyage de 4 heures.  $G = 100 X$

- (a) aggloméré individuel
- (b) aggloméré multiple

#### 7.4 La morphologie de la fraction fine :

La fraction fine de la poudre retenue dans l'assiette est très importante dans le broyage des poudres. Cette fraction est considérée comme étant le rendement d'un broyeur mécanique. En effet la performance de la machine est mesurée par l'importance de cette fraction. Généralement cette fraction est le produit de plusieurs phénomènes se produisant individuellement ou simultanément. Les figures (6.6a) et (6.6b) montrent un exemple de forme de particule susceptible d'être trouvées dans le lot de la fraction fine. Les particules de la fraction fine sont souvent en forme d'écailles ou de flocons.

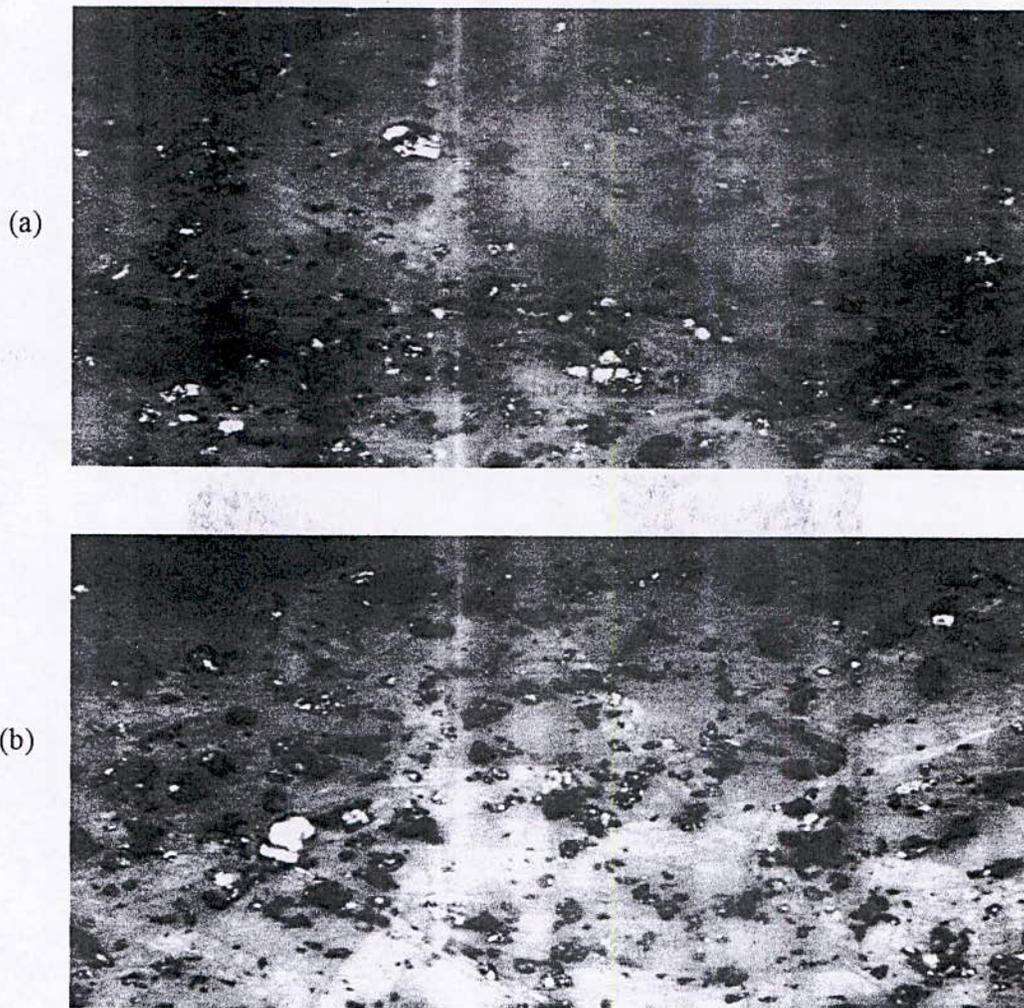


Figure (6.6) : Photomicrographies optiques montrant la morphologie de la fraction fine en forme d'écailles. G = 600 X

La figure (6.7) ci-dessous, montre l'évolution morphologique des particules de poudre depuis la forme de bâtonnet, puis la forme nodulaire, ensuite vers la forme de beignet qui plus tard sous l'action d'un micro-forgeage continu, évoluera vers une forme sphérique comme montée dans les figures précédentes.

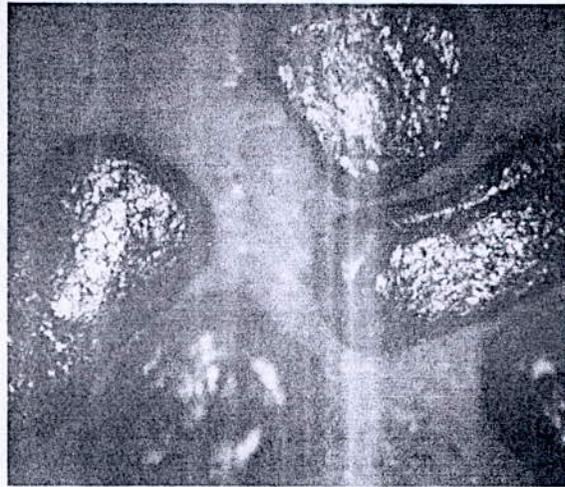


Figure (6.7) : Photomicrographie optique montrant l'évolution de la morphologie des particules de poudre.  $G = 100 X$

La figure 6.8 ci-dessous illustre l'état de surface d'une particule de poudre obtenue après un broyage de 4 heures. La figure montre que l'état de surface des particules, est rugueux. Ce constat est d'autant plus vrai que la particule est grossière. En effet, une grosse particule est sujette à de fortes sollicitations aux chocs à cause de sa taille et de sa masse. Une grosse particule massive est projetée contre un substrat fixe avec une plus grande force, comparée à une plus petite. D'où la rugosité observée comme résultat direct des chocs violents subis.



Figure (6.8) : Photomicrographie optique montrant un état de surface rugueux, d'une particule de poudre.  $G = 600 X$

**Equation paramétrique de simulation :**

L'équation paramétrique de simulation, est la relation reliant tous les facteurs influençant la taille moyenne des particules de poudre obtenues. Pour le cas du broyage mécanique des copeaux d'aluminium, dans un broyeur à percussion à lames, l'équation correspondante est de la forme suivante :

$$D_m = t^{-p} \cdot V^{-q}$$

Où :

$D_m$  : taille moyenne de la poudre produite ( $\mu\text{m}$ )

T : temps de broyage (heure)

V : vitesse de broyage (tr/min)

Cette équation peut être très intéressante pendant les travaux de simulation mathématique du broyage mécanique des matériaux métalliques

### CONCLUSION GENERALE :

L'intérêt capital recherché dans ce travail, a été l'élaboration d'une poudre d'aluminium par broyage mécanique à percussion en utilisant les copeaux d'usinage comme matière première. Ainsi, cette manipulation pratique nous a permis de mieux comprendre l'effet des facteurs régissant les mécanismes impliqués lors de cette opération. Après la caractérisation par tamisage du produit broyé, en terme de taille moyenne et de forme des particules observées par microscope optique, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le mécanisme le plus influant dans la réduction de la taille des poudres est le cisaillement. Ce mécanisme opère principalement au début de processus.
- Un bon rendement en matière de taille des particules est obtenu pendant la première heure de broyage. Un broyage prolongé ne permet pas de réduire davantage la taille, mais en revanche il permet d'augmenter la fraction de la taille fine.
- La vitesse de broyage est un paramètre déterminant dans l'évolution de la taille et de la forme des particules.
- Un broyage à petites vitesses ne permet pas d'élaborer des poudres de qualité (poudre fine).
- La morphologie des particules de poudre obtenue, évolue en fonction du temps, depuis la forme irrégulière des copeaux à une forme de grain café, vers une forme sphérique.
- La fraction fine est un résultat de l'attrition. Les particules formant cette fraction, sont des écailles ou des flocons.
- La friction entre les particules de poudre, cause une agglomération par attraction mutuelle à cause des forces électrostatiques.
- Le prolongement du temps de broyage influe sur la forme des particules par micro-forgeage à froid et continu.
- Le procédé permet d'obtenir une multitude de formes de particules : irrégulière, nodulaire, flocon, sphérique...etc. Ces formes variées peuvent servir dans différentes applications de la métallurgie des poudres.

### Perspectives pour travaux ultérieurs

- Faire une caractérisation approfondie du produit broyé tels que :
- L'analyse par microscopie électronique de l'état de surface des particules.
  - Etude de coulabilité de la poudre.
  - Elimination du phénomène d'agglomération afin d'avoir une caractérisation plus précise.
  - Un traitement préalable de fragilisation par traitement thermique du matériau à broyer est préconisé.
  - Etude de la frittabilité.
  - Mise en forme de cette poudre par compactage des particules en flocons.
  - Etudier les différents domaines d'utilisation de cette poudre.
  - Changer les outils actuels du broyeur par d'autres plus durs.

## References bibliographiques

- [1] Senna, M, and Kuno, H. polymorphic transformation of PbO by isothermal Wet ballmilling, J. Am. Ceram. Soc, vol 54 (No.5), May 1971.
- [2] Kuhn, W.E, and lucky, H, Characterization of Ball- Milled Type 316-L Stainless steel, powder, fine particles, W.Kuhn and J. Ehrestmann, Ed, The electrochemical society, Inc, 1974, p95-121
- [3] Griffith, A.A, Trans.Roy. Soc. Lond, Vol A 221, 1921, p 163.
- [4] Gilvarry, J.J. and Borgstrom, B.M, fracture and Communion of Brittle Solids, AIME Tans, Vol 220, 1961,p380.
- [5] Harris, C.C, ON The Limit of Communion, Trans. Soc. Mining Eng, March 1967, p17-30.
- [6] Kuhn, W.E, High Energy Milling of Electrolytic Iron powder, modern developments in Powder Metallurgy, Vol 12, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1980, p195-218.
- [7] Patel, A.N. and Kuhn, W.E, Influence of High Energy of Vibra-Milling on the Annealed and sintered Structures and properties of a P/M AusteniticStainless steel, Modern Developments in powder metallurgy, Vol 13, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1980, p27-50
- [8] Arias, A, Oxyde dispersion Strengthened Nickel Producedby nonreactive milling, ' NASA TMX-3331, Jan1976.
- [9] Arias, A, 'Chemical Reactions of Metal powders With organic inorganic Liquids During Ball milling'. NASA TN D-8015, Sept 1975.
- [10] R. Ourahmoune, Conception et réalisation d'un broyeur à lames et élaboration d'une poudre de bronze à partir des copeaux d'usinage, pfe juin 2003, p54
- [11] Rose, E. and Sullivan, R.M.E, A Treastise on Rite Internal Mechanics of Ball, Tube, Rod Mills, CHEmical Publishing Co, New York, 1958.
- [12] U.S Patent 4 172 720, Oct 1972.
- [13] British Patent 1 224 736, Jan 1969.
- [14] U.s Patent 4 115 107, Sept 1978.
- [15] Gilman, P.S. and Nix, W.D,The structure and propreties of Aluminium alloys produced by mechanical alloying : powder processing and resultant powder structures, Met, Trans, Vol 12A, May 1981, p 813.
- [16] Babich , B.N. et al. Production of dispersion- strengthened Nickel-Tungsten- Aluminium alloy by mechanical alloying, proshkovaya metall. Vol 235 (No 7), July 1982, p 44-47.
- [17] Benjamin, J.S, and Bonford, M.V, dispersion strengthened Aluminium made by mechanical alloying, Met trans, Vol 8A, Aug 1977, p 1301.
- [18] Webster, O., Effect of Lithium on the mechanical properties and microstructure of SiC Whisker reinforced Aluminium alloys, Met , Trans., Vol 13A , Aug 1982, p1516.
- [19] Domazer, H.G., New Milling Process for fine grinding of powder alloys in Gas-Tight Attrition Mill, powder metall. Int, Vol 10 (No.3), 1978, p 150.
- [20] Ingénieurs du groupe de pechiney- aluminium Vol 1.Ed EYROLLES (1964). P 339-342\_357.
- [21] R.ferhoum ; réalisation et caractérisation d'un multimatériau à base d'alliage d'aluminium « AS12 » Thèse de magister, ENP, octobre 2002.
- [22] J. Barralis et G .Maeder, précis de métallurgie, 5 ed, 1990 Nathan, p 124-127.
- [23] S. Jacob. Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie. Technique de l'ingénieur juin 2001, p 6-7
- [24] M.Z. Amar, Elaboration et caractérisation d'une poudre d'acier obtenue par broyage mécanique des copeaux d'usinage, pfe juin 2004.