

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



PROJET DE FIN D'ETUDES



Proposé et dirigé par :
Dr A. KASSER

étudié par :
S. ACHACHE

Promotion 2009

10, Avenue Pasteur, BP N° 182 El Harrach Alger

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى تحديد مدى تأثير العوامل المتمثلة في: مدة الطحن، الكمية المطحونة، الكمية الطاحنة وحجم الحدادة الابتدائي. على خصائص المسحوق الناتج عن طريق الطحن الميكانيكي للحدادة في عدة فترات زمنية.

تخصيص المسحوق الناتج بين لنا بأن حجم الأجزاء المتحصل عليها جد صغير، وهذا راجع إل هشاشة الصلب.

الكلمات المفتاحية: تعدين المساحيق، الطحن الميكانيكي، تخصيص المسحوق، الخراطة.

Résumé :

Le but de ce travail consiste à élaborer une poudre de fonte 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, la charge broyante et la taille du copeau initial. La caractérisation de la poudre ainsi élaborée a montré que les copeaux de fonte sont certes facilement pulvérisable en poudre, cependant que la taille moyenne des particules obtenues est très petite à cause de la grande dureté des phases constituant la fonte utilisée. .

Les mots clés : Métallurgie des poudres, Broyage mécanique, poudre, broyeur, fonte, tournage, graphite.

Abstract

The aim of this work is to produce a powder material from machining chips of cast iron by mechanical grinding. The experimental study focussed en the comprehension of the effects of the grinding variables on the properties of the powder produced. The variables that have been studied were: milling time; the initial masse of chips milled; the grinding masse and the initial size of chips. The characterisation of the powder produced showed that the cast iron chips are indeed quite easy to disintegrate into fine particles. However, the mean size of the particles produced is quite small because of the high hardness of different phases which make up the cast iron used as raw material.

Key words: cast iron; machining chips; mechanical grinding, powder; graphite

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes chers parents*
- *Mon grand père et mes deux grandes mères*
- *Mes frères et ma sœur*
- *Mes tantes et mes oncles*
- *Mes cousins et mes cousines*
- *Tous mes amis de l'École : samado,
brahim, samir, rahim, ishak, amine, jalel,
latif, saci, akram, othmane.....etc*
- *Tous ceux qui comptent pour moi*

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier vivement Mr A.KASSER mon encadreur pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils et son aide précieuse.

Je tiens à remercier également Mr M. BOUABDELLAH pour m'avoir honoré en acceptant de présider le jury, Mr A. DAIMELLAH, et Mme N. KECHOUD d'avoir accepté de juger mon travail, cela constitue un honneur pour moi.

Je voudrai également remercier tous mes enseignants du département de métallurgie de l'ENSP, pour avoir participé à ma formation.

Mes remerciements vont également à M. SAADA du département génie Minier pour m'avoir permis d'effectuer mes expériences au sein du laboratoire du génie minier dont il est le responsable.

Finalement, mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué d'une quelconque manière à l'aboutissement de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : METHODES D'ELABORATION DES POUDRES METALLIQUES	
1. Intrduction	3
1.2 LES PROCEDES MECANIQUES:.....	3
1.2. 1 Le procédé MarcoMesh :.....	3
1.2.2 Le procédé Cold Stream	3
1.2.3 Le procède Nitrofine Cold Grinding	4
1.3 LES PROCEDES CHIMIQUES :.....	4
1.3.1 Le procédé de réduction des oxydes	4
1.3.2 Le procédé de précipitation hydrique	4
1.3.3 Décomposition thermique, Procédé carbonyle	5
1.4 LE PROCEDE ELECROLYTIQUE:.....	5
1.5 LES PROCEDES PHYSIQUES.....	5
1.5.1L'atomisation:.....	5
1.5.2 L'électrode tournante :.....	6
1.5.3 Le procédé d'hydrogène dissous	7
CHAPITRE 2 : LE BROYAGE MECANIQUE	
2. 1 NTRODUCTION	8
2. 2 LES PRINCIPES DU BROYAGE :.....	9
2. 2. 1 FRACTURE FRAGILE	9
2.2. 2 LE BROYAGE DES MATERIAUX DURS ET FRAGILE.....	10
2. 2. 3 LE BROYAGE DES PARTICULES INDIVIDUELLES.....	12
2. 3 PARAMETRES DE BROYAGE ET CARACTERISTIQUES DES POUDRES.....	13
2.3.1 RELATION DE L'ENERGIE	16
2. 3. 2 PROCESSUS DE BROYAGE	17
2. 3. 2. 1 MICRO-FORGEAGE	17
2. 3. 2. 2 FRACTURE.....	17
2. 3. 2. 3 AGGLOMERATION	18
2. 3. 3 MECANISME DE BROYAGE	18
2. 3. 4 : ENVIRONNEMENT DU BROYAGE.....	19
2. 4 INFLUENCE DU BROYAGE SUR LES PROPRIETES DES POUDRES.....	19
CHAPITRE 3 : LES EQUIPEMENTS DE BROYAGE	
3.1 Introduction.....	21
3.2 le broyeur a boulet Tumbler.....	21
3.2.1. Les paramètres de charge d'un broyeur a boulets.....	22
3.3. les broyeurs a vibration de boulets.....	22
3.3.1. le broyeur a tube vibratoire.....	22
3.3.2. le broyeur a vibration SWECO.....	25
3.3.3 les broyeurs a attrition.....	26

3.3.4 Broyeurs planétaires à billes.....	26
CHAPITRE 4 : LES FONTES	
4.1 Introduction.....	29
4.1.1 Les fontes blanches.....	29
4.1.2 Les fontes grises	29
4.1.2.1 Fontes grises lamellaires	30
4.1.2.2 Fontes grises sphéroïdales	30
4.2 Constituants et phases des Fontes	31

CHAPITRE 5 : PROCEDURE EXPERIMENTALE

5.1- Introduction	34
5.2 DEROULEMENT DES EXPERIENCES.....	34
5.3 DESCRIPTION DES EXPERIENCES	35
5.3.1. Préparation métallographique des échantillons	35
5.3.2. Observation au microscope optique	35
5.3.3 Fabrication des copeaux	36
5.3.4 Caractérisation des copeaux.....	36
5.3.5. Description de l'opération de broyage.....	37
5.3.6. Descriptions des tamis	38
5.3.7. Description du vibreur à tamis	38
5.3.8. Description de la balance électronique	38

CHAPITRE 6: RESULTATS EXPERIMENTAUX

6.1 Composition chimique de matériau utilisé	39
6.2 Caractérisation des copeaux d'usinage.....	40
6.3 Résultats du broyage des copeaux d'usinage.....	42
6.3.1 Broyage des copeaux grossiers.....	42
6.3.2. Broyage des copeaux moyens.....	44
6.3.3. Broyage des copeaux fins.....	47
6.4. Influence des paramètres de broyage sur la taille moyenne de la poudre broyée.....	57

CHAPITRE7 : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

7-1 Introduction.....	62
7-2 Influence du temps de broyage et la taille du copeau initial.....	62
7.3 Influence de la charge broyante sur le produit broyé.....	65
7.4 Influence de la charge broyée.....	66
7.5 Evolution de la fraction fine lors du broyage	66
7.6 Optimisation du procédé.....	67
Propositions pour travaux ultérieurs.....	69

INTRODUCTION GENERALE

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 (FeSO_4 , CuSO_4 ,...) ou par précipitation en solution ammoniacale d'hydroxyde, lesquels par calcination à l'air sont convertis en oxyde anhydres (ZrO , Al_2O_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 μm .
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 joints de grains.

Le sujet de recherche présenté dans cette thèse, porte justement sur cette dernière méthode citée au dessus. En effet des copeaux d'usinage de la fonte sont utilisés comme matière première pour la production d'une poudre de fonte. Ces copeaux produits par tournage sont broyés à l'état brut sans aucun traitement préalable en utilisant un broyeur à boulets. Durant ce travail, les principales variables de broyage étudiées sont : le temps de broyage, la charge broyante, la taille de copeau initial et la masse broyée. Les résultats obtenus ont montrés que la taille des particules de poudre produite est fortement dépendante de ces variables.

La partie bibliographique de ce travail présente au chapitre I, un aperçu théorique sur les diverses techniques d'élaboration des poudres métalliques, ensuite il traite aux chapitre II et III la théorie de broyage et les équipements utilisé pour cette opération, au chapitre IV on parlera sur la fonte.

La partie expérimentale est constituée de trois chapitre, dont le premier traite le déroulement des expériences menées, dans le deuxième, on présentera les résultats obtenus, pour les interpréter au chapitre trois. Pour terminer notre étude, on donne une conclusion générale.

CHAPITRE 1 : METHODES D'ELABORATION DES POUDRES METALLIQUES

1.1 INTRODUCTION :

La production des poudres métalliques constitue le premier stade des processus de la métallurgie des poudres. Elle est d'une très grande importance, Les procédés de fabrication de poudres métalliques doivent permettre d'obtenir, à des prix acceptables, des quantités importantes de poudres, des métaux et alliages exigés par les utilisateurs. Leurs caractéristiques physiques et chimiques doivent répondre à des spécifications précises. [1]

Les méthodes de fabrication des poudres peuvent se classer en quatre groupes essentiels:

- Procédé physique
- Procédé chimique
- Procédé mécanique
- Procédé électrolytique

1.2 LES PROCEDES MECANIQUES:

Les techniques mécaniques consistent à diviser un solide par un moyen approprié. Ces techniques sont essentiellement basées sur le choc dont font partie les nombreux procédés de broyage [2]. Parmi les techniques de broyage les plus intéressantes, on peut citer :

1.2. 1 Le procédé Marco-Mesh :

General Motors a développé aux États-Unis un procédé de broyage de copeaux d'usinage d'acier ou de fonte malléable. L'utilisation de broyeurs à marteaux permet d'obtenir des poudres assez grossières (0,2 à 0,7 mm). Elles peuvent servir à faire des pièces de grandes dimensions, soit par compactage à froid et frittage, soit encore mieux, par mise en forme et frittage simultanés (forgeage à chaud des poudres). [1]

1.2.2 Le procédé Cold Stream :

Dans ce procédé, le matériau à pulvériser est entraîné par un jet de gaz et projeté à grande vitesse sur une cible fixe. La poudre obtenue est tamisée et les particules grossières sont réintroduites dans l'enceinte pour subir un nouvel impact sur la cible. La détente adiabatique des gaz à la sortie de la buse créant un effet de refroidissement très important participe à la fragilisation des particules. Le procédé opère à une température nettement inférieure à celle ambiante [2]. Ce procédé, est utilisé pour pulvériser des matériaux durs, abrasifs et coûteux comme le carbure de tungstène, les alliages de tungstène, le molybdène, le Béryllium...etc.[2]

1.2.3 Le procédé Nitrofine Cold Grinding :

Ce procédé, a été développé en Grande-Bretagne par British Oxygen en vue de récupérer les copeaux d'acier doux pour être transformé en poudre par broyage cryogénique. Les copeaux triés, pré concassés, sont d'abord refroidis par l'azote gazeux froid, puis introduits dans un broyeur refroidi à l'azote liquide. La température de broyage étant bien au-dessous de la température de transition fragile-ductile de l'acier, il faut assez peu d'énergie pour pulvériser les copeaux. La rupture étant fragile, les particules obtenues sont de forme angulaire et à arêtes vives, ce qui donne une poudre à très bonne compressibilité et à bonne résistance mécanique à l'état comprimé. [1]

1.3 LES PROCÉDES CHIMIQUES :

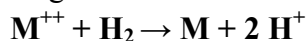
1.3.1 Le procédé de réduction des oxydes :

Ce procédé consiste, à réduire les oxydes métalliques (à l'état de minerai enrichi) en utilisant des agents réducteurs à une température légèrement inférieure à celle de fusion du métal. L'agent réducteur utilisé peut être le coke sous forme de poudre, ou un gaz réducteur comme l'hydrogène ou le monoxyde de carbone. La poudre obtenue par cette méthode est de forme irrégulière avec des pores dans les particules. [3]

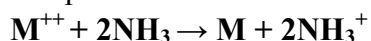
Le procédé HOGANAS, le plus important des procédés, basés sur la réduction par le carbone consiste, à réduire un minerai de fer enrichi et purifié au préalable par du charbon dans un creuset chauffé vers 1200°C en présence de CaCO₃. L'éponge de fer obtenue est ensuite broyée et purifiée par triage magnétique puis recuite pour donner une poudre de taille allant de 10 à 150µm. Cette poudre se caractérise par une grande porosité à cause de l'échappement des gaz (CO), et par une forme irrégulière des particules à cause de la déformation par broyage, ce qui les rend très compressibles [4].

1.3.2 Le procédé de précipitation hydrique :

La production d'une poudre de métal par le procédé d'hydrométallurgie est basée sur la filtration des minerais, suivie par la précipitation du métal à partir de la solution filtrée. Cette méthode est connue depuis plus de 100 ans, mais elle n'a été commercialisée qu'après 1950. Ce procédé consiste, en une précipitation à partir d'une solution aqueuse, en utilisant l'hydrogène. Le concept est simple : les ions métalliques tels que le nickel, le cobalt ...etc. réagissent dans la solution avec l'hydrogène suivant les réactions suivantes :



Ou par une solution ammoniacale telle que :



La pureté des poudres métalliques produites est de l'ordre de 98,8 %. Avec ce procédé, on peut également obtenir des poudres alliées, si on fait co-précipiter différents métaux à partir d'un mélange de plusieurs solutions.

1.3.3 Décomposition thermique, Procédé carbonyle :

La décomposition thermique de composés comme les carbonyles de métaux de transition (Fe, Ni, Co, W, Mo, etc.), a été appliquée industriellement au fer et au nickel. Ces carbonyles, liquides à bas point d'ébullition [43 °C pour Ni(CO)₄ et 107 °C pour Fe(CO)₅], se forment en faisant passer de l'oxyde de carbone sous pression (200 bar) entre 150 et 250 °C sur le métal, même impur. La décomposition du carbonyle, à la pression atmosphérique entre 200 et 300°C, fournit une poudre sphéroïdale extrêmement pure dont la taille varie entre 1 et 50µm. [1]

1.4 LE PROCEDE ELECROLYTIQUE:

L'électrolyse de solutions aqueuses des sels métalliques avec anode soluble ou non soluble est utilisée pour la production de plusieurs poudres métalliques de très haute pureté. Telles que : Fe, Cu, Sn, Cr, Mn...etc. Il existe deux méthodes pour l'électrodéposition.

1. La déposition directe, soit en poudre de faible adhérence inter-particules, donnant un dépôt spongieux qui est facile à broyer en particules fines. Les poudres de cuivre, d'or, d'argent et de zinc sont facilement produites par ce procédé.
2. La déposition d'un amas dense en couche fragile de métal qui peut être réduit en poudre par broyage mécanique. Les poudres de fer et de manganèse sont produites de cette façon.

La qualité et la quantité du dépôt électrolytique obtenu dépendent des conditions d'électrolyse comme : la composition chimique et la concentration de l'électrolyte, la température du bain, l'agitation de l'électrolyse et la densité du courant électrique appliquée. Des substances colloïdales qui servent de germes, pour une précipitation plus rapide des cristallites, sont fréquemment ajoutées au bain liquide. [5]

Les poudres électrolytiques se présentent souvent sous forme de grains à structure dendritique. Leur densité apparente est faible, et leur coulabilité est médiocre. Elles s'agglomèrent facilement par imbrication de leurs rameaux dendritiques.

Le plus souvent, ces poudres sont broyées, recuites à moyennes températures puis tamisées pour donner la granulométrie désirée, et en même temps pour les rendre plus dense, plus plastique et par conséquent plus compressible si elles sont destinées pour le compactage. [3]

1.5 LES PROCEDES PHYSIQUES

1.5.1 L'atomisation:

C'est l'une des méthodes les plus récentes dans l'histoire de la MDP. Elle consiste à pulvériser un jet vertical de métal liquide par un courant violent d'eau ou de gaz sous pression, et peut être appliqué à la plupart des métaux et alliages de point de fusion inférieur à 1600°C [1]. La poudre métallique ainsi produite est récoltée au fond de la chambre d'atomisation. La taille et la forme des particules de poudre ainsi que leur structure, dépendent de la nature du

fluide atomiseur utilisé, des paramètres d'atomisation et du métal atomisé [3]. L'atomiseur avec ses principaux détails, est présenté dans la figure (I.1) ci-dessous :

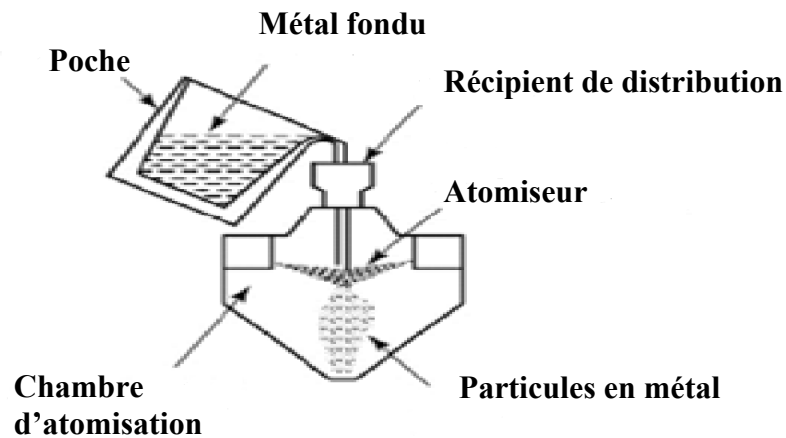


Figure I.1 : Vue schématique d'un atomiseur [3]

1.5.2 L'électrode tournante :

L'électrode tournante est un procédé de production des poudres métalliques qui consiste principalement, à faire tourner une barre cylindrique de nuance connue à une vitesse de l'ordre de 2000 tr/s, comme le montre la figure I.2 ci-dessous. La barre est chauffée par un arc électrique, plasma ou par bombardements électroniques. Le métal fondu est projeté en l'air sous forme de fines gouttelettes, par l'action des forces centrifuges. Des vitesses de refroidissement de l'ordre de 10^3C.s^{-1} , sont atteintes, lorsque les particules de poudre sont refroidies dans l'espace. Après solidification, les particules de poudre sont collectées au fond d'une chambre dont l'atmosphère est contrôlée. Les poudres produites ont une forme sphérique avec une surface lisse. Elles ne présentent aucun défaut de surface ni porosité. [6]

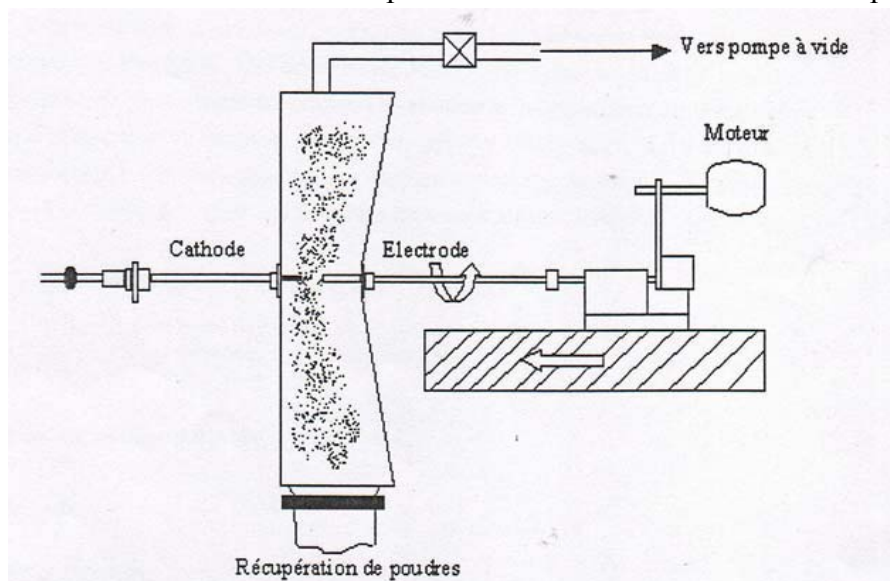


Figure I.2. Le procédé de l'électrode tournante. [6]

1.5.3 Le procédé d'hydrogène dissous :

Ce procédé consiste, à dissoudre une quantité d'hydrogène dans le métal liquide, puis verser ce métal liquide dans une chambre sous vide. Grâce au vide ambiant dans la chambre d'atomisation, le métal liquide explose par précipitation de l'hydrogène dissous. L'explosion du métal désintègre le métal liquide en fines gouttelettes, qui se solidifient rapidement dans l'atmosphère neutre de la chambre. La taille des particules ne peut être contrôlée par ce procédé. Par contre, la forme des particules est, soit sphérique ou sous forme de flocons, ces caractéristiques dépendent de la taille de la chambre sous vide.[3]

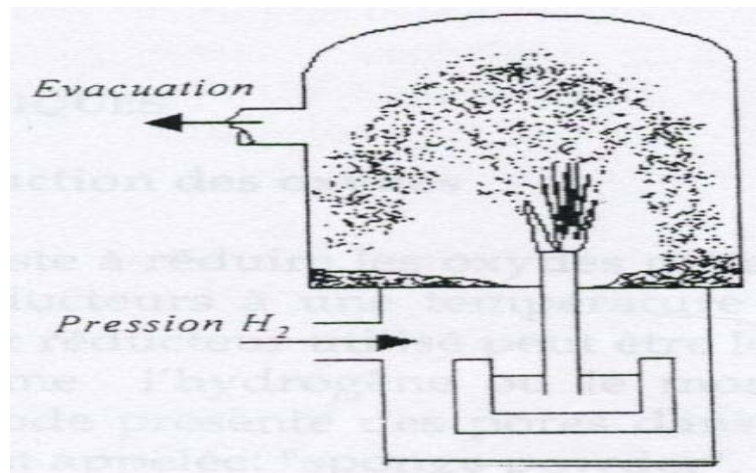


Figure I.3 Pulvérisateur sous vide. [3]

CHAPITRE 2

LE BROYAGE MECANIQUE

2.1 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 du 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 et ses alliages. 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. Dans cette optique, 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 [7]. 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 impliquant la formation de plusieurs formes de particules en même temps [7], comme c'est le cas pour les oxydes de plomb, et les aciers inoxydables [8]. 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 les 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 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.

2. 2 LES PRINCIPES DU BROYAGE :

2. 2. 1 FRACTURE FRAGILE

La théorie énoncée par GRIFFITH [9] assume que, tous matériau fragile contient des fissures bien dispersées, qui engendrent sa fracture. La contrainte σ_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 [9].

$$\sigma_c = A \left(\frac{\gamma E}{c(1-\mu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

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.

μ : Le coefficient de Poisson.

γ : 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, γ varie entre 10^3 et 10^4 erg/cm².

La contrainte σ , pour la fracture d'une particule peut être représentée par [9].

$$\sigma = \left(\frac{2Er}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Où :

L : la longueur de la fissure

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

Trois types de défauts (faciaux en volume ou en arête) ont été découverts par Gilvary [10] 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'elles 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 ces défauts en activation, génère de nouvelles fractures et donc des subdivisions à l'infini. [11]

2.2. 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. Les facteurs majeurs qui contribuent à un broyage limite sont [10].

- 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 [12].

2. 2. 3 LE BROYAGE DES PARTICULES INDIVIDUELLES

Les poudres sont caractérisées selon la taille des particules, leur distribution dans une masse donnée, leur forme ainsi que leur état de surface individuelle ou globale. Ces caractéristiques déterminent la coulabilité, la densité apparente, la couleur, la frittabilité, la compressibilité et les propriétés des produits frittés. Les figures (2.1) montrent certaines de ces propriétés.

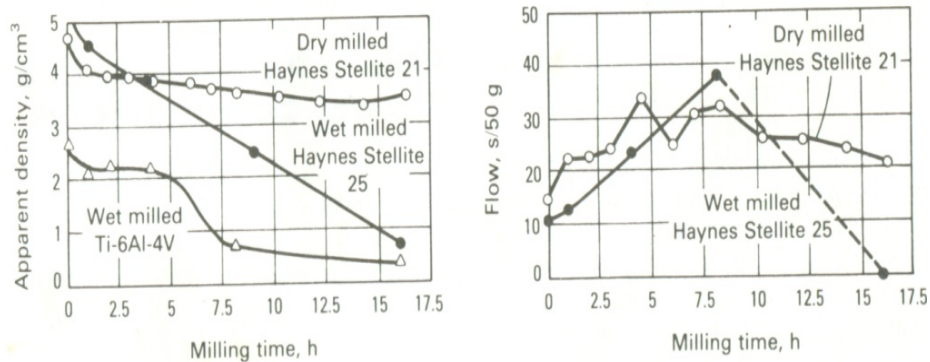


Figure 2.1 : Effet du temps de broyage à vibration sur la densité apparente et le Champs de coulabilité d'une poudre à base de cobalt et de titane [12].

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 2.2, 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 granules 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 2.2.a. Durant le broyage des métaux ductiles montrés en figure 2.2.b, les particules individuelles ne se fracturent pas, mais

se déforment, en impliquant un changement de forme avec un changement de masse négligeable.

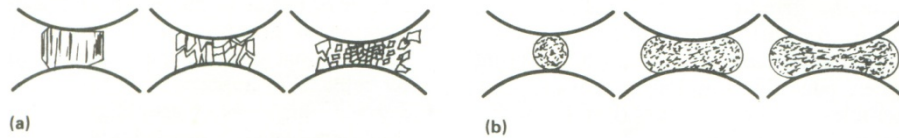


Figure 2.2 : Effet de l'impact sur les matériaux fragiles et ductiles [12]

(a) fragile, (b) ductile

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 (2.3).

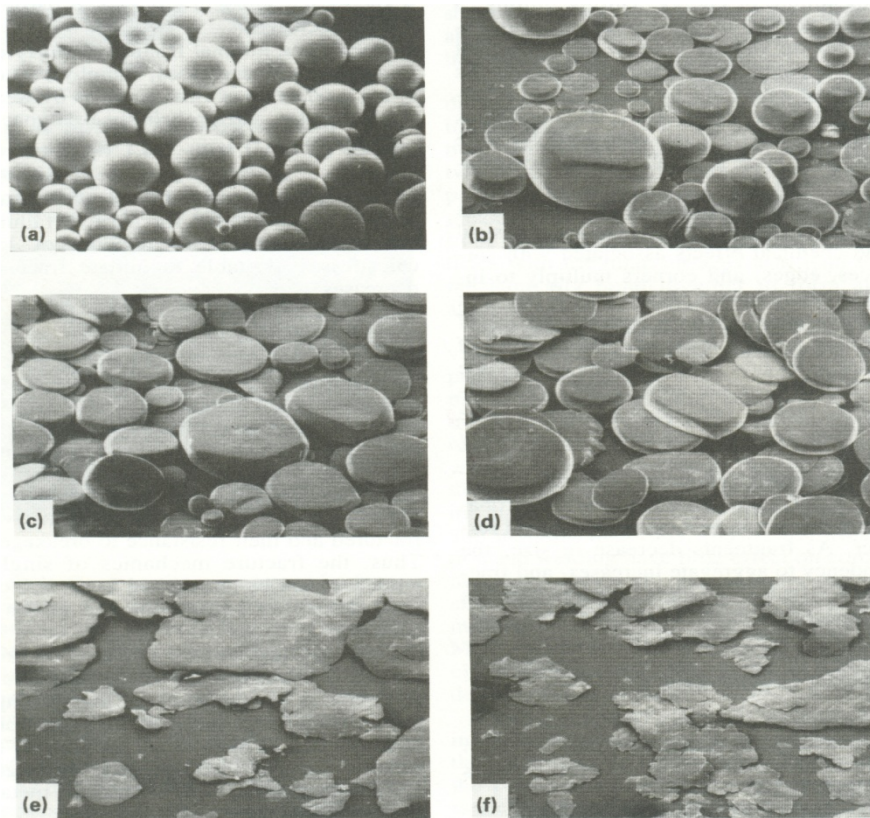


Figure 2.3 : Effet du temps de broyage sur le changement de forme des particules sphériques d'un alliage de Ti-6Al-4V [12]

2.3 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 2.4 montre le changement de largeur du flocon de poudre d'aluminium, de nickel et de palladium purs, broyés dans un agitateur SPEX à l'ambiante, en fonction du temps de broyage. 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.

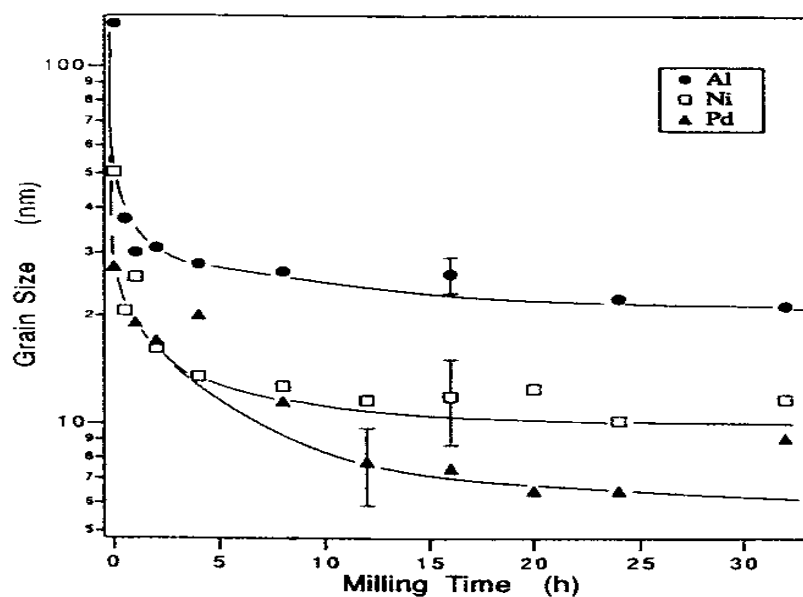


Figure 2.4- Evolution, en fonction du temps de broyage, de la taille des domaines diffractants (déterminée par diffraction de rayons X), assimilée à la taille moyenne des grains de poudre d'aluminium, de nickel ou de palladium purs, broyés dans un agitateur SPEX à l'ambiante [13]

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/cm³, 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 subis par les particules durant le broyage. Comme le montre la figure 2.5, la mesure de la dureté est significative jusqu'à un temps de broyage approprié à un maximum de travail à froid produit.

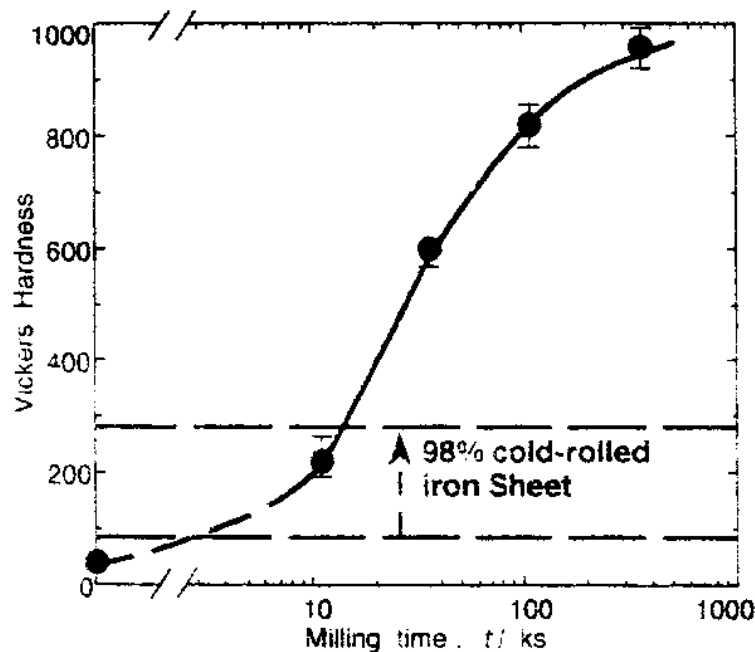


Figure 2.5 - Evolution, en fonction du temps de broyage (exprimé en $S.10^3$), de la dureté Vickers du fer pur broyé dans un broyeur planétaire à température ambiante dans des conditions non précisées. Le point correspondant à la dureté la plus élevée a été mesuré après 100 h de broyage. Les lignes tirets permettent de comparer avec la dureté Vickers d'une feuille de fer pur non laminée (ligne tirée la plus basse) ou laminée à froid à 98% (ligne tirée la plus haute) [13].

2.3.1 RELATION DE L'ENERGIE

Le broyage agit par chocs et/ou par frottement des billes sur la poudre, suivant le type de broyeur utilisé. Lors du contact des billes avec la poudre, la majeure partie de l'énergie cinétique des billes transférée à la poudre, se transforme aussitôt en chaleur. On assiste donc à une élévation locale de température à l'endroit des cisaillements. Ces cisaillements, sont entretenus lorsque le broyage agit par frottement et sont ponctuels lorsque le broyage agit par chocs. Schwarz et Al ont proposé une formulation pour estimer cette élévation locale de température [13] :

$$\Delta T = F (\Delta t / P K_0 \rho_p C_p)^{1/2}$$

Où : F : est l'énergie dissipée dans le plan de glissement au niveau des cisaillements, et vaut $\sigma_n V_b$

σ_n : est la contrainte normale d'impact égale à $\rho_p V_1 V_b$

ρ_p : est la densité de la bille.

V_1 : est la vitesse longitudinale du son dans la bille (dans l'acier, ~ 5800 m/s)

V_b : est la vitesse de la bille.

Δt : est le temps d'application de l'énergie F , et vaut $2D_b/v_1$, où D_b est le diamètre de la bille. k_0 , ρ_p et C_p sont respectivement la conductivité thermique, la densité et la chaleur spécifique de la poudre.

2. 3. 2 PROCESSUS DE BROYAGE

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

Processus	Symboles de désignation
Micro-forgeage	M
Fracture	F
Agglomération	A
Soudure (liaison atomique)	A_w
Imbrication	A_m
Auto- adhésion	A_a
Dés agglomération	D

2. 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.

2. 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.

2. 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.

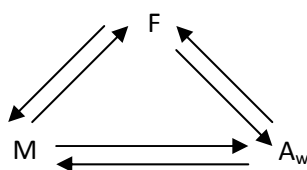
L'auto cohésion, est l'interaction moléculaire des particules entre elles ; elle est caractérisée par les forces de van-Der-Waals.

La désagglomération est le processus qui casse les agglomérés formés par auto cohésion, sans désintégrer les particules individuelles de poudre.

2. 3. 3 MECANISME DE BROYAGE :

Un mécanisme 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 écrasées 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 2.6 ci-dessous.

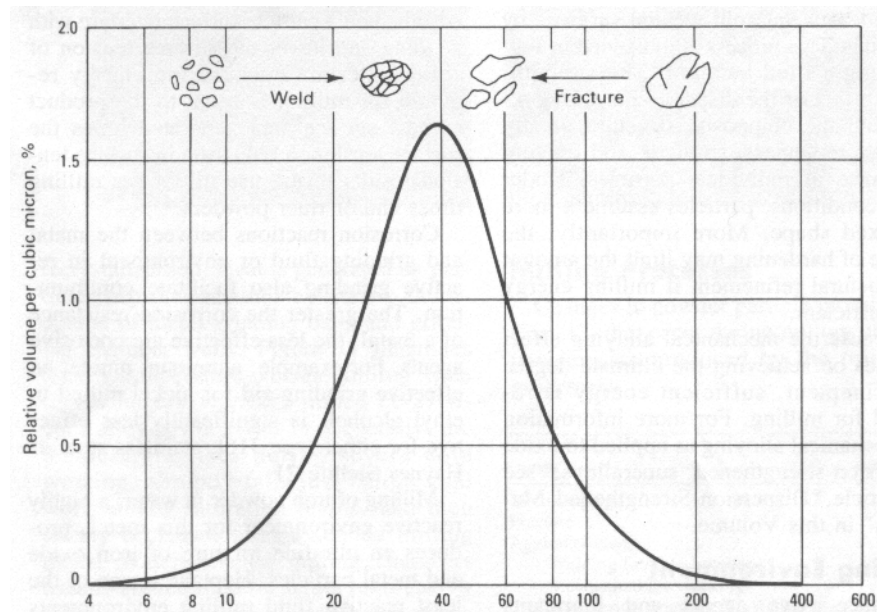


Figure 2.6 : courbe de distribution de tailles étroite, à cause de la tendance des petites particules à se souder et des grosses à se fracturer [14]

2. 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 court 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 [15].

2.4 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 physiques et chimiques 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.

CHAPITRE 3 : LES EQUIPEMENTS DE BROYAGE

3. 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 requis 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.

3.2 LE BROYEUR A BOULET TUMBLER

Dans le broyeur Tumbler montré dans la figure (3.1), 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. [17]

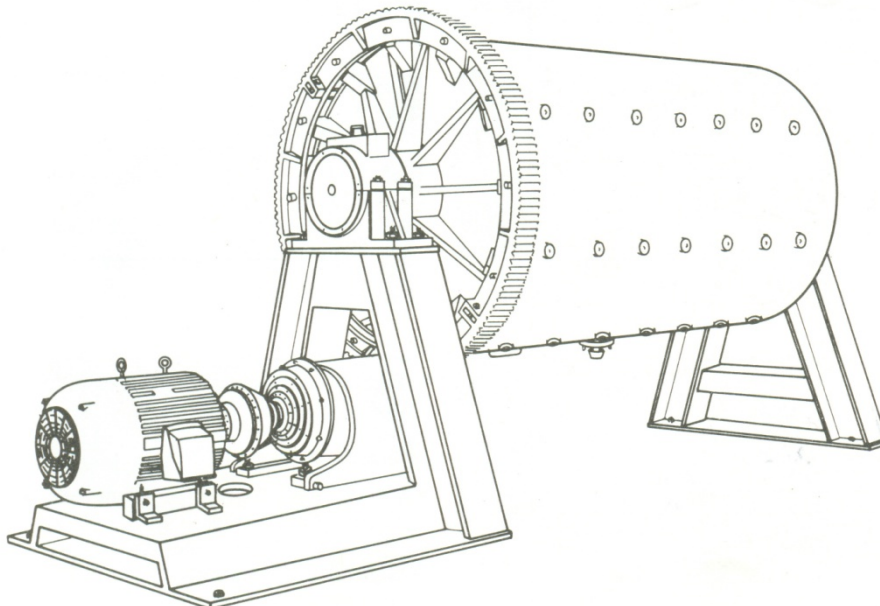


Figure 3.1 Le broyeur Tumbler utilisé pour la production des poudres de métaux [16]

3.2.1 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 [17]. 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 [17]:

$$N_c = 76.6 \sqrt{\frac{1}{D}} \quad (3.1)$$

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 est satisfaite. Pour les grands plateaux de production de superalliages 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 où a 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. [18]

3.3 LES BROYEURS A VIBRATION DE BOULETS :

3.3.1 LE BROYEUR A TUBE VIBRATOIRE :

Dans le laboratoire du broyeur à tube vibratoire montré dans la figure (3.2), 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.

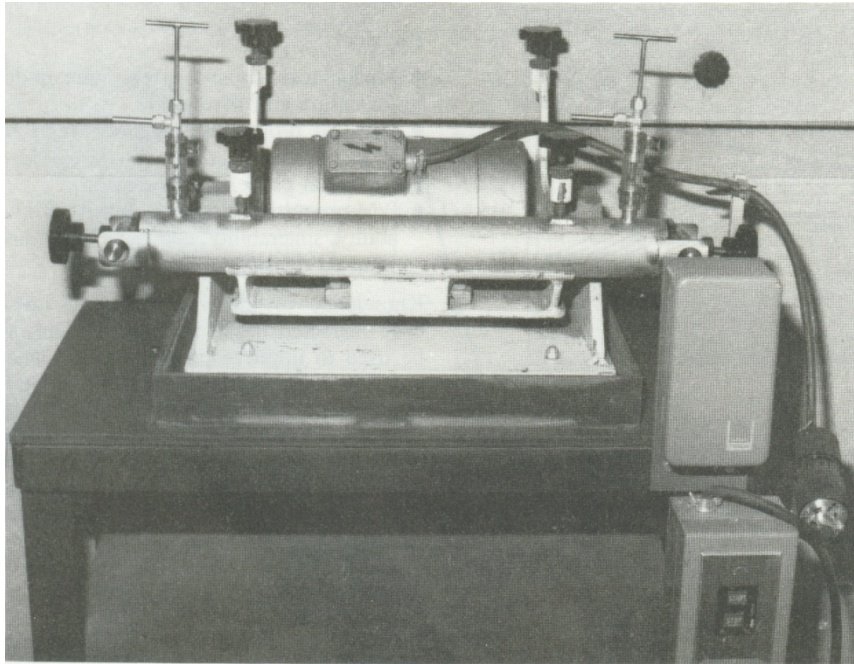


Figure (3.2) : le broyeur à boulets à vibration Megapact [17]

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 (3.2.), 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 (3.3.a) et (3.3.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 (3.1.)

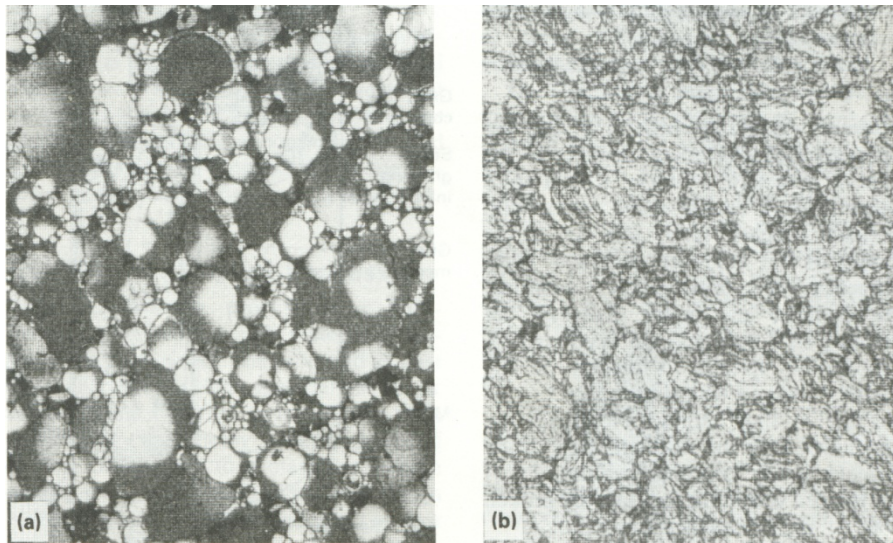


Figure (3.3) : Homogénéisation d'un alliage de AL-Fer-Ce au moyen d'un broyeur à haute énergie [17]

Dans les gros broyeurs à tube, montré dans la figure (3.4.), 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

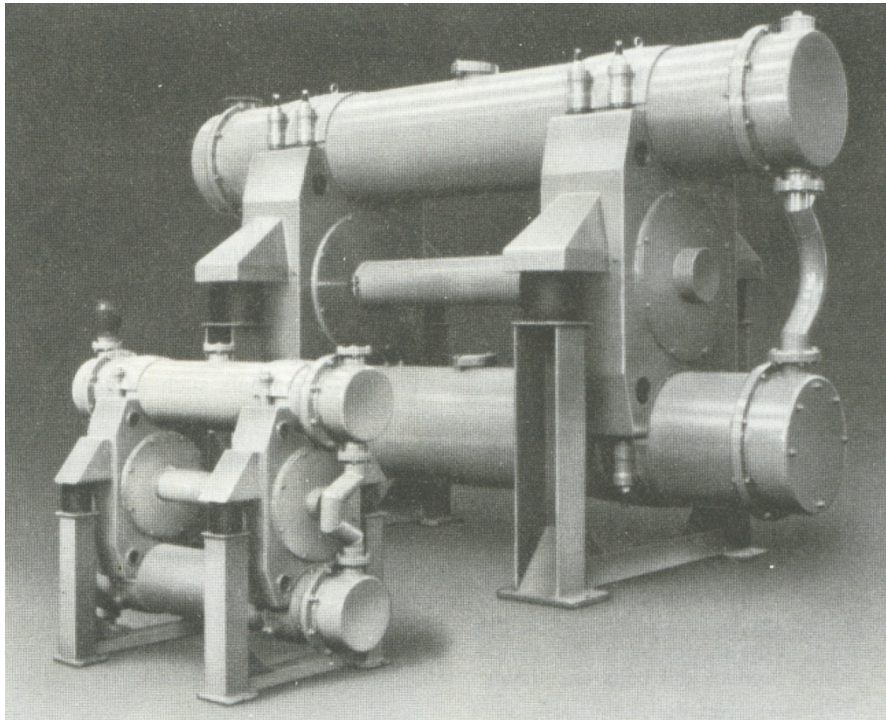


Figure (3.4) : Broyeur à vibration pilot [17]

3.3.2 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 (figure3.5).

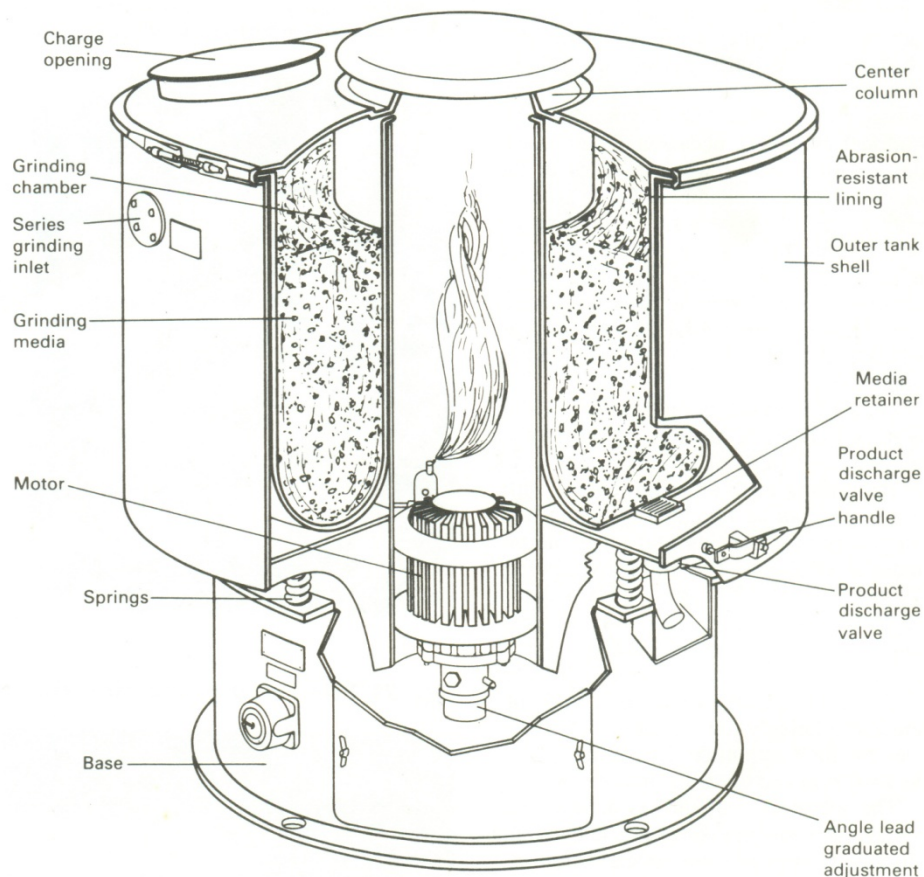


Figure (3.5) : Le broyeur SWECO pour le broyage humide à vibration [18]

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.

3.3.3 Broyeurs à attrition

Un broyeur à attrition appelé aussi Attriteur, est un broyeur à boules capable de produire des énergies plus élevées. Il se compose d'un tambour vertical avec une série de bras tournant à l'intérieur. Placés perpendiculairement à un axe vertical tournant, ces bras entraînent dans leur mouvement la charge composée de boules broyantes et du produit broyé. Cela provoque la réduction de la taille des particules de poudre, par impact entre les boules et la paroi du récipient et aussi entre les boules et l'axe de l'agitateur. Une certaine réduction de la taille

semble avoir lieu par des collisions inter particules et par le glissement des boules. Un moteur puissant fait tourner les bras, qui agitent à leur tour les boules en acier dans le fût.

Les broyeurs à Attrition sont les broyeurs, dans lesquels de grandes quantités de poudre peuvent être broyées à la fois (environ 0.5 à 40 kilogrammes). La figure.3.6 ci-dessous montre le principe du procédé. La vitesse du milieu de broyage est faible, elle est d'environ 0.5 m/s, par conséquent, l'énergie des broyeurs à attrition est basse.

L'opération d'un broyeur à attrition est simple. La poudre à broyer est placée dans un réservoir stationnaire avec les éléments de broyage. Ce mélange est alors agité par un axe avec des bras solidaires, tournant à une vitesse d'environ 250 t/mn, comme le montre la figure3.6.b. Le système exerce des forces de cisaillement et d'impact sur le matériau provoquant sa pulvérisation. Les appareils de laboratoire fonctionnent à des vitesses, parfois 10 fois plus grandes que les broyeurs conventionnels à boules [19].

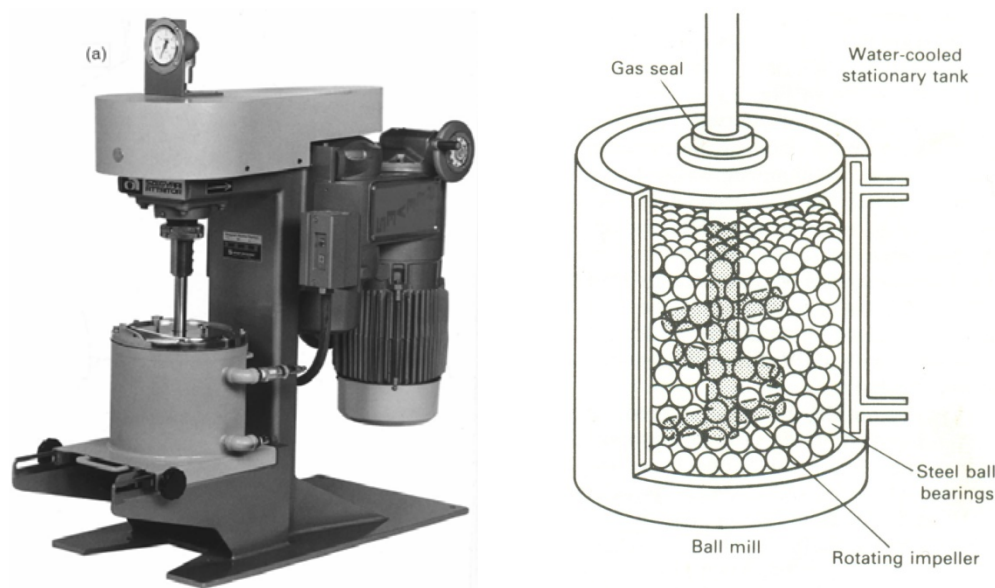


Figure.3.6. (a) Attriteur modèle 1-S. (b) Arrangement des bras tournants sur un axe dans le broyeur à attrition.[19]

3.3.4 Broyeurs planétaires à billes

L'un des broyeurs célèbre pour entreprendre des expériences de broyage mécanique, est le broyeur planétaire à billes (désigné sous le nom de Fritsch Pulverisette), dans lequel quelques une centaine de grammes de poudre peuvent être broyées à la fois comme le montre la figure 3.7. Le broyeur planétaire à boules doit son nom aux planètes en mouvement du système solaire. Ainsi, des fioles sont fixées sur un disque de soutien tournant, et un mécanisme d'entraînement spécial fait tourner ces fioles autour de leurs propres axes. Une force centrifuge est produite par les fioles tournant autour de leurs propres axes, mais aussi par le disque tournant de soutien. La combinaison des deux forces, agit sur le contenu des fioles qui se compose de la poudre et des billes de broyage. Cependant, les fioles et le disque de support

tournent dans des directions opposées, ce qui fait que, les forces centrifuges agissent alternativement dans les fioles avec des directions opposées. Ces deux mouvements opposés provoquent chez les billes de broyage en bas de la paroi intérieure de la fiole, l'effet de frottement. Cela est suivi d'un déplacement libre de ces billes, qui se heurtent contre la paroi intérieure donnant ainsi l'effet d'impact comme illustré par la figure 3.7.b.

Quoique la vitesse linéaire des billes dans ce type de broyeur soit plus haute que celle des broyeurs à secousses, en revanche, la fréquence des impacts est beaucoup plus grande dans les broyeurs planétaires. Par conséquent, comparés aux broyeurs à secousses, les broyeurs planétaires à billes peuvent être considérés comme des broyeurs à basse énergie. [19]

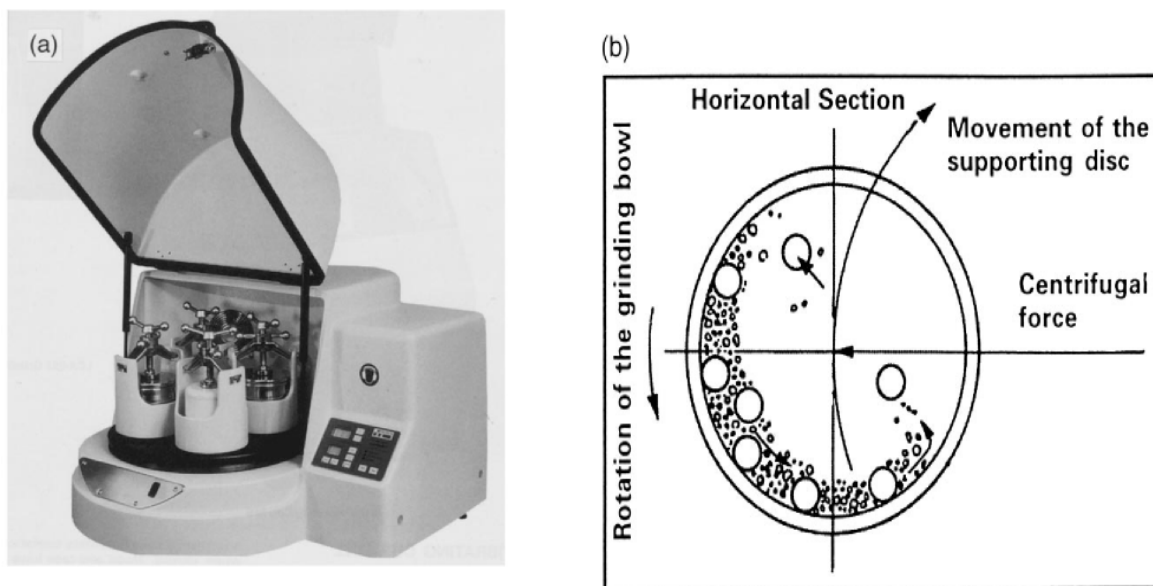


Figure.3.7. (a) Station de broyeur à billes de type Fritsch Pulverisette P-5 quatre. (b) Schéma montrant le mouvement des billes à l'intérieur du broyeur.[19]

CHAPITRE 4 : LES FONTES

4.1 Introduction

Les fontes sont en majorité composées, de fer, de carbone et de divers éléments d'alliage (silicium, molybdène, nickel...). Ces matériaux sont choisis pour la réalisation de pièces de formes complexes qui doivent être produites en fonderie. La présence de carbone, dont la teneur varie théoriquement de 2.17 à 6.67% en masse, facilite leur élaboration en abaissant la température de fusion, en améliorant le remplissage des moules (coulabilité) et en évitant la formation de défauts par retrait du matériau, lors de sa solidification (retassures). Le carbone étant présent en quantité trop importante pour se dissoudre dans la matrice, apparaît sous la forme de carbures ou de graphite, lamellaire ou sphéroïdal.

La fonte a une température de fusion allant de 1 135 °C à 1 350 °C en fonction du pourcentage de carbone et de silicium qu'elle contient .

4.1.1 Les fontes blanches :

Elle contient un peu de silicium (moins de 0.8%) ; une plus forte proportion de manganèse (1%) pour accroître la solubilité du carbone dans la fonte, 1.5 à 2.5% de phosphore ; des traces de soufre, car le soufre rend la fonte cassante et donne des soufflures. Le carbone s'y trouve sous forme de carbure de fer (Fe_3C). Possédant une bonne coulabilité, et un aspect blanc brillant, la fonte blanche est principalement utilisée pour les pièces d'aspect et la fonderie d'art. Très résistante à l'usure et à l'abrasion, elle est très difficilement usinable [20].

Les principales qualités des fontes blanches sont :

- une excellente résistance à l'usure et l'abrasion
- un bel aspect
- une excellente coulabilité

Les principaux défauts sont :

- difficilement usinable

4.1 .2 Les fontes grises :

Elles sont caractérisées, par la présence de carbone libre disséminé sous forme de paillettes dans la masse. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, ou l'ajout de composants graphitisants comme le silicium.

On distingue deux classes de fontes différenciées par la forme des particules de graphite :

4.1.2.1 Fontes grises lamellaires :

Ce sont des alliages Fe-C-Si, qui contiennent des impuretés inévitables comme le Mn, S et P. Le graphite dans ces fontes est partiellement sous forme de lamelles. Ces fontes ont pratiquement des teneurs en carbone comprises entre 3 et 4%, et inférieur à 3% en Si.

Les principales qualités des fontes GL sont :

- facilité d'usinage ;
- très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud ;
- très bonne absorption des vibrations ;
- excellente coulabilité ;

Les principaux défauts :

- relativement fragile comparé aux aciers.

4.1.2.2 Fontes grises sphéroïdales :

Ce sont des fontes dans lesquelles le graphite se trouve sous forme sphéroïdale. Elles sont obtenues par l'addition du Magnésium qui confère au graphite la forme sphéroïdale pendant la cristallisation.

A cause de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, elles sont très utilisées dans diverses branches de l'industrie :

- Pièces pour l'industrie automobile (engrenages, vilebrequins)
- Pièces pour l'industrie chimiques et pétrolière (conduites, pompes)
- Pièces pour l'industrie lourde (cylindre de laminoirs, pièces pour presse....)

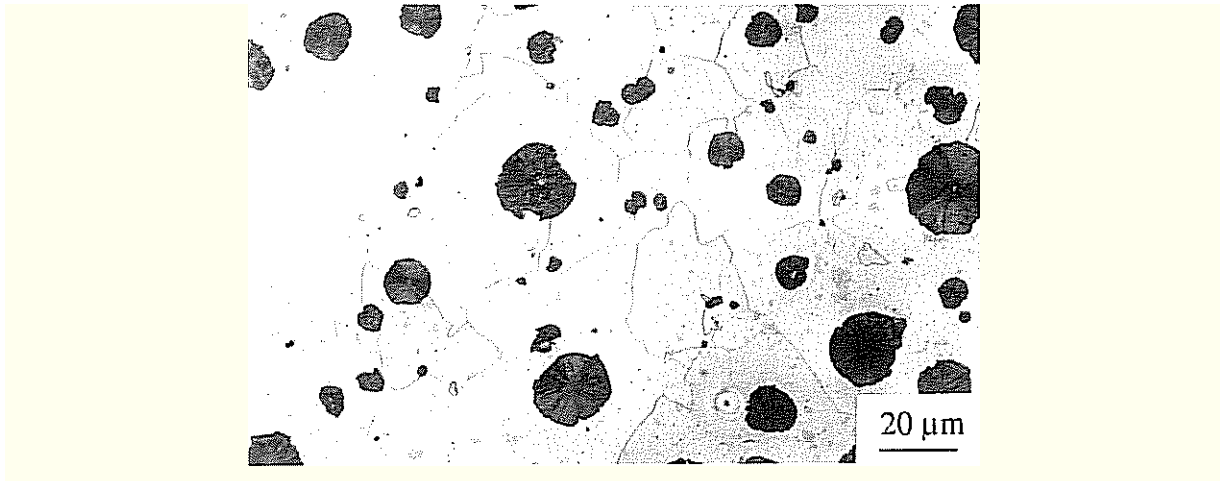


Figure (4.1). - Nodules de graphite dans une fonte GS à matrice ferritique [20]

Caractéristiques mécaniques :

Grâce à la forme sphéroïdale du graphite, les fontes à graphite sphéroïdal possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques proches de celles des aciers. Ces caractéristiques dépendent essentiellement de la constitution de la matrice :

- Les fontes à matrice ferritique présentent une résistance suffisamment élevée couplée à une bonne capacité à se déformer plastiquement, ainsi qu'une bonne résistance aux chocs. Leur faible résistance à l'usure leur donne une bonne aptitude à l'usinage.
- La limite d'élasticité et la charge à la rupture des fontes à matrice perlitique sont très élevées. Elles sont obtenues en contrepartie d'une faible ductilité.
- Les caractéristiques mécaniques des fontes à matrice ferrito-perlitique sont évidemment comprises entre celles des deux fontes précédemment citées. Elles offrent un bon compromis entre résistance mécanique, ductilité et résistance à l'usure [20].

4.2 Constituants et phases des Fontes :

L'excès de carbone provoque la formation de phases, qui donnent à la fonte une structure composite. Les composants qui vont être cités ici sont ceux que l'on peut rencontrer sur le matériau brut de coulée.

a) La ferrite :

C'est le principal constituant de la matrice. Elle se compose d'atomes de fer (α), assemblés selon une structure cristallographique cubique centrée, dans laquelle sont dissous les éléments

d'alliage (Si, Mo,...). Le carbone n'y est présent qu'en très faible quantité (0,02 % en masse). La ferrite pure est stable jusqu'à environ 725 °C, température à laquelle elle perd sa structure cubique centrée pour se transformer en austénite de structure cubique faces centrées. Cette température de transformation, varie avec la teneur en éléments d'alliage [20].

A la température ordinaire les caractéristiques de la ferrite sont :

- Relativement douce (90 HV)
- Très ductile (A=35%)
- Résilience (K=30)
- Masse volumique égale à 7,86 gr /cm³

b) La cémentite :

C'est un carbure dû à la combinaison du fer et du carbone, de formule chimique Fe₃C. La cémentite est très dure (700 à 800 HB), mais fragile, sa charge de rupture à la traction est très élevée (175 à 200 daN /mm²) [20].

c) La perlite :

C'est un eutectoïde qui se présente généralement sous forme lamellaire ; chaque grain est formé de lamelles alternées de ferrite et de cémentite, dont l'épaisseur et l'écartement dépendent de la vitesse de refroidissement.

Ce composé est obtenu par un refroidissement rapide effectué à partir de la phase austénitique. Il ne peut donc pas être présent à l'état brut de coulée. Son apparition est fonction de la vitesse de trempe et de la teneur en éléments d'alliage.

La perlite est formé de 87% de ferrite et de 13% de cémentite, elle est très dure (200HB), résistante (Rm=850N/mm²) et assez ductile (A=10%).



Figure (4.2). Perlite présente dans une fonte GS à matrice ferrito-perlitique
[20]

d) Le graphite

On distingue, deux classes de fontes différenciées par la forme des particules de graphite : les fontes à graphite lamellaire et les fontes à graphite nodulaire (*figure.4.1*). Comparativement au graphite lamellaire, le graphite nodulaire permet à la fonte d'avoir des caractéristiques mécaniques très proches de celles des aciers car la forme des nodules minimise l'effet d'entaille dans la matrice [20].

CHAPITRE 5: PROCEDURE EXPERIMENTALE

5.1. INTRODUCTION :

Le recyclage des déchets provenant de l'usinage des pièces métalliques, est d'une grande importance pour les industries mécaniques et métallurgiques. Ce recyclage consiste à réduire les copeaux d'usinage à l'état de poudre par broyage mécanique, puis à la mise en forme de cette poudre par compactage, suivi d'une consolidation par un frittage pour leur donner les propriétés voulues. Plusieurs paramètres de broyage influent sur la forme et la taille moyenne des particules de poudre obtenue, lesquelles si elles sont bien combinées peuvent permettre l'obtention d'un bon produit. Parmi ces variables on distingue :

- La charge broyée.
- La charge broyante
- Le temps de broyage
- La taille initiale des copeaux
- La vitesse de broyage
- La structure initiale des copeaux broyés

5.2 DEROULEMENT DES EXPERIENCES :

Le présent travail consiste en la production d'une poudre de fonte à partir des copeaux d'usinage d'un barreau cylindrique en fonte. On commence par produire trois gammes des copeaux (grossiers, moyens, fins), on les caractérise par tamisage et pesée puis on les introduit dans un broyeur à boulets, le produit obtenu est caractérisé par tamisage, pour déterminer la taille moyenne du produit broyé pour rendre l'étude plus exhaustive, on a étudié l'influence des paramètres suivants sur la taille des particules de poudres obtenues :

- La taille initiale des copeaux d'usinage
- Le temps de broyage
- La charge broyante
- La charge broyée

5.3 DESCRIPTION DES EXPERIENCES

5.3.1. Préparation métallographique des échantillons

Une préparation métallographique nécessite plusieurs étapes. Le polissage mécanique réalisé manuellement vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface, sous une charge constante, à l'aide de papiers abrasifs de grade progressif, montés sur des tourets de polissage. La diminution de la taille des grains abrasifs d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne de la surface à observer. Compte tenu de la différence de dureté existant entre le carbure abrasif et la matrice métallique, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines, caractéristiques des sillons laissés par les grains du papier. Le polissage à la main des échantillons se fait selon la séquence suivante : 80 => 120 => 220 => 400 => 600 => 1000 => solution d'oxyde d'aluminium à 1 μm et enfin solution d'oxyde d'aluminium à 0.3 μm (ou pâte diamantée). Chaque séquence dure environ 3 minutes avec un refroidissement continu à l'eau de robinet. Après avoir transformé la surface à observer en un miroir, une attaque chimique de cette surface à l'aide du Nital à 4% est réalisée afin de révéler la microstructure de la fonte. Le Nital est préparé comme suit :

- 4 ml d'acide nitrique (HNO_3)
- 96 ml d'alcool éthylique (ou méthylique)

Le temps d'attaque est de quelques secondes (15 à 20 secondes). Ce réactif est utilisé pour le fer, les fontes grises, et les aciers faiblement alliés. Un nettoyage à l'éthanol et un séchage par flux d'air chaud termine le polissage mécanique, les échantillons ainsi polis et attaqués chimiquement, peuvent alors être observés au microscope optique.

5.3.2. Observation au microscope optique

Un microscope optique de type OLYMPUS permet l'observation des échantillons, avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000x. Ce microscope s'accompagne d'une caméra, reliée à l'écran d'un ordinateur permettant la capture de photos de la structure observée après avoir choisi la surface à photographier. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. La figure ci-dessous montre une photo réelle du microscope optique utilisé. La figure (5.1) montre le microscope utilisé



Figure 5.1 photo réelle du microscope optique utilisée

5.3.3 Fabrication des copeaux

On fabrique les copeaux à partir de lingot cylindrique de fonte. Le choix de fabriquer les copeaux au lieu de les récupérer dans un atelier d'usinage, nous donne la possibilité de contrôler leur taille (comme c'est le cas dans ce travail), en variant les paramètres d'usinage tels que :

- La forme de l'outil utilisé
- La vitesse de rotation du mandrin
- La pénétration de l'outil
- La vitesse d'avance de l'outil

5.3.4 Caractérisation des copeaux

Les trois gammes de copeaux(grossiers, moyens, fins) sont caractérisées séparément en plaçant une quantité de 250 grammes de chaque gamme dans une série de tamis qui sont disposés dans l'ordre croissant de bas en haut. La masse de copeaux est versée dans le tamis supérieur, puis l'ensemble des tamis sont placés dans une machine à vibrations pendant un temps de 12min. Ce temps normalisé permet de séparer les différentes gammes de taille des copeaux. A l'issue de cette opération, on procède à la pesée du refus retenu par chaque tamis à l'aide d'une balance électronique de haute précision. Les résultats de pesée sont utilisés pour calculer la taille moyenne des copeaux et établir la courbe de distribution des tailles. Pour calculer la taille moyenne on utilise l'équation suivante :

$$D_m = O_1 X_1 + (O_1 + O_2)/2 \cdot X_2 + (O_2 + O_3)/2 \cdot X_3 + \dots + (O_n + O_{n+1})/2 \cdot X_{n+1} \quad (V.1)$$

Où : D_m est la taille moyenne des particules en μm .

O_1, O_2, \dots, O_n sont les ouvertures des tamis en μm .

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

5.3.5. Description de l'opération de broyage

Le broyeur utilisé dans le présent travail est un broyeur à boulets à vibration. Le broyeur est composé de deux chambres, de forme torique, avec des boulets à l'intérieur. Chacune des deux chambres est liée, au moyen d'un arbre de transmission et d'un réducteur de vitesse à roue et vis sans fin, à un moteur électrique. Ce dernier assure une rotation à vitesse constante de la chambre qui lui est liée. Cette vitesse est de 50 tr.min^{-1} . La figure ci-dessous montre une photo réelle du broyeur utilisé.



Figure 5.2. Photo réelle du broyeur à boulets utilisé.

Dans son mouvement de rotation, le broyeur génère un mouvement des boulets à l'intérieur de la chambre, et au cours duquel, les particules subissent des chocs de trois manières différentes. Soit elles sont prises entre deux boulets en contact, entre le boulet et les parois de la chambre au cours de la montée des boulets ou alors elles subissent le choc par le fait de la chute des boulets. Au cours de ce mouvement, les particules de poudre se trouvent incrustées de microfissures ; ces dernières se propagent de la surface vers le volume pour former des cracks qui finissent par fragmenter la particule en deux particules secondaires ou plus.

5.3.6. Descriptions des tamis

Un tamis est un récipient de forme cylindrique, contenant dans son fond un filtre à mailles carrées. Pendant l'opération de tamisage, les particules qui ont une taille inférieure à la taille de la maille, passent à travers le tamis. Par contre celles qui ont une taille supérieure ou égale à la taille de la maille, celles-ci restent dans le tamis. L'ensemble des particules qui sont retenues par le tamis, est appelé refus. La figure ci-dessous montre schématiquement une série de tamis semblables à ceux utilisés dans cette caractérisation.

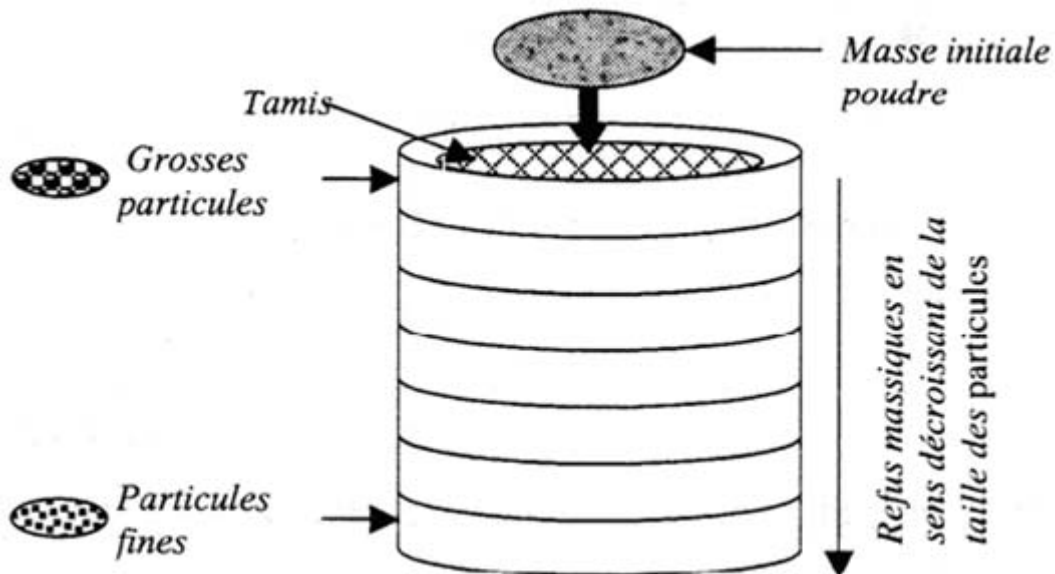


Figure 5.3. Vue schématique de l'opération de tamisage.

5.3.7. Description du vibreur à tamis

C'est un appareil qui permet la vibration et la séparation de la poudre initiale en plusieurs fractions de tailles moyennes distinctes. Cette séparation se réalise en une seule opération de tamisage qui dure un temps de 12 min. Le principe de fonctionnement est basé sur la génération de vibrations de hautes fréquences grâce à un moteur électrique et d'un système d'arbre à cames lui même lié à un système de fixation composé de deux anneaux. Un anneau où reposent les tamis et un anneau supérieur, qui permettent la fixation et le serrage des tamis. L'ensemble est fixé sur un châssis couplé au moteur qui permet la transmission des vibrations à toute la série de tamis.

5.3.8. Description de la balance électronique

Une balance électronique a été utilisée pour peser les poudres obtenues, ainsi que les différents refus retenus par chaque tamis. C'est une balance à affichage digital avec une précision de $\pm 0,1$ gramme. La balance possède quatre appuis réglables qui permettent de régler le plateau de façon horizontale. Cela permet d'avoir une pesée précise, par le fait d'une distribution homogène de la charge sur le plateau de la balance.

CHAPITRE 6 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

6.1 Composition chimique de matériau utilisé :

Nous avons utilisé un barreau cylindrique pour la fabrication des copeaux dont le métal de base est la fonte grise à graphite sphéroïdal et sa composition chimique est représentée dans le tableau 6.1 ci-dessous :

Tableau (6.1) Analyse par spectromètre de la composition chimique du lingot de fonte utilisé pour fabriquer les poudres.

% C	% Si	%Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo
3.51	1.88	0.382	1.38	0.074	0.068	0.22	0.021

La photomicrographie de cette structure est montrée sur la **figure (6.1)**

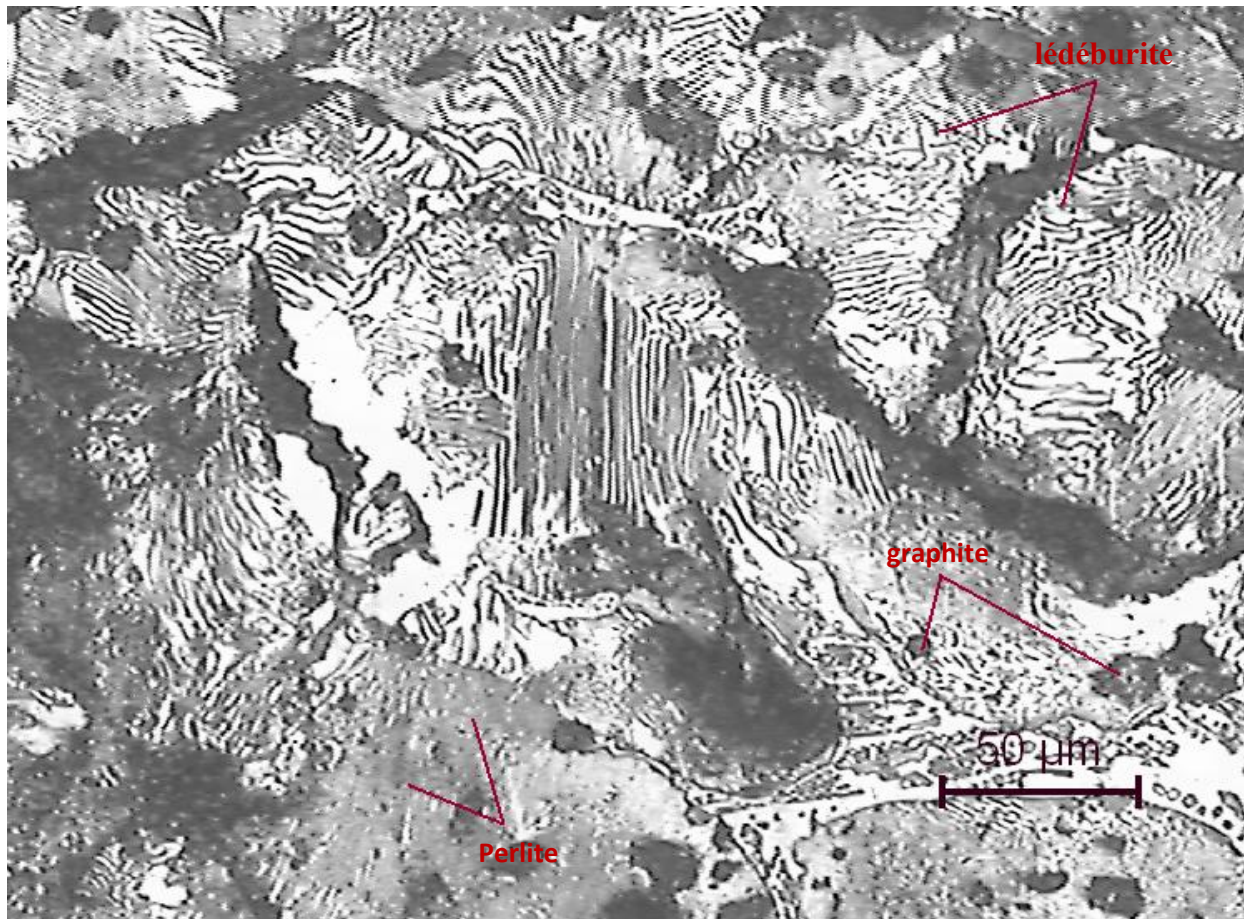


Figure (6.1) Photomicrographie optique de la fonte GS utilisé. La fonte utilisée est une fonte hypoeutectique (< 4.3% C) avec une structure de lédéburite + perlite + graphite G=200X.

6.2 Caractérisation des copeaux d'usinage :

Après avoir produit les copeaux de fonte par usinage au tour, nous avons procédé à la caractérisation de ces copeaux par la technique de tamisage. Les résultats sont présentés dans les tableaux et les graphes ci-dessous. La masse des copeaux tamisés est de 250grs.

Tableau 6.2 copeaux grossiers (dm=1302,8(μm))

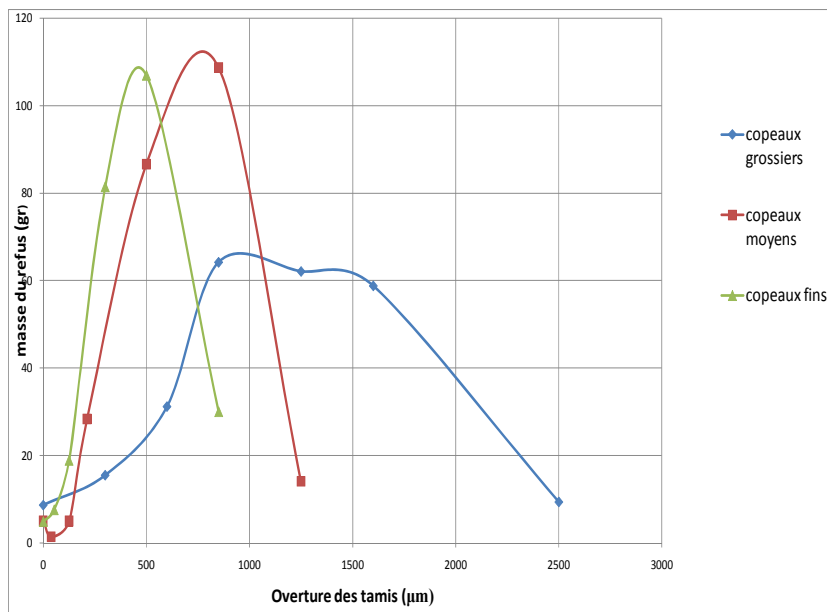
Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
2500	9,4	0,03
1600	58,8	0,23
1250	62,1	0,24
850	64,2	0,25
600	31,2	0,12
300	15,5	0,06
Assiette	8,69	0,03

Tableau 6.3 copeaux moyens (dm=805,36(μm))

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
1250	14,1	0,05
850	108,7	0,43
500	86,6	0,34
212	28,3	0,11
125	5	0,02
38	1,4	0,005
assiette	5	0,02

Tableau 6.4 copeaux fins (dm=540(μm))

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
850	30	0,12
500	106,9	0,42
300	81 ,4	0,32
125	18,9	0,07
53	7,6	0,03
Assiette	4,9	0,01

**Figure 6.2 distribution de taille des copeaux (grossiers, moyens, fins)**

6.3 Résultats du broyage des copeaux d'usinage

Après avoir caractérisé les copeaux initiaux, nous avons procédé à leur broyage en utilisant un broyeur à boulets. Les paramètres utilisés sont :

- Le temps de broyage
- La charge broyante
- La charge broyée
- La taille du copeau initial

Les résultats du broyage sont présentés dans les tableaux et les figures ci-dessous.

6.3.1 Broyage des copeaux grossiers

- Charge broyée 250grs
- Charge broyante 1334 grs
- $D_{mi}=1302,8 \mu m$

Tableau 6.5 résultats de tamisage après 0.5h de broyage ($D_m=516,99(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
1250	1,4	$5.6 \cdot 10^{-3}$
850	17,9	0,07
600	60,1	0,24
300	131,7	0,52
150	20,8	0,08
assiette	17,3	0,06

Tableau 6.6 résultats de tamisage après 1h de broyage ($D_m=400,9(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
850	1,2	$4,8 \cdot 10^{-3}$
600	17,8	0,07
300	169,7	0,68
150	29,1	0,11
125	17	0,06
53	10,1	0,04
assiette	4,1	0,01

Tableau 6.7 résultats de tamisage après 2h de broyage ($D_m=310,06(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
600	1,3	$5,29 \cdot 10^{-3}$
300	124,1	0,5
212	31,8	0,12
150	29,8	0,12
125	37,7	0,15
53	15,2	0,06
assiette	5,7	0,02

Tableau 6.8 résultats de tamisage après 4h de broyage ($D_m=196,6(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
425	0,9	$3,7 \cdot 10^{-3}$
300	50,8	0,2
150	67,1	0,27
125	92,5	0,38
53	25,9	0,1
assiette	6,2	0,02

Tableau 6.9 résultats de tamisage après 8h de broyage ($D_m=149,6(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
300	6,1	0,02
250	12,6	0,05
212	15,8	0,06
150	38,5	0,15
125	121,6	0,5
53	39,5	0,16
assiette	7,1	0,02

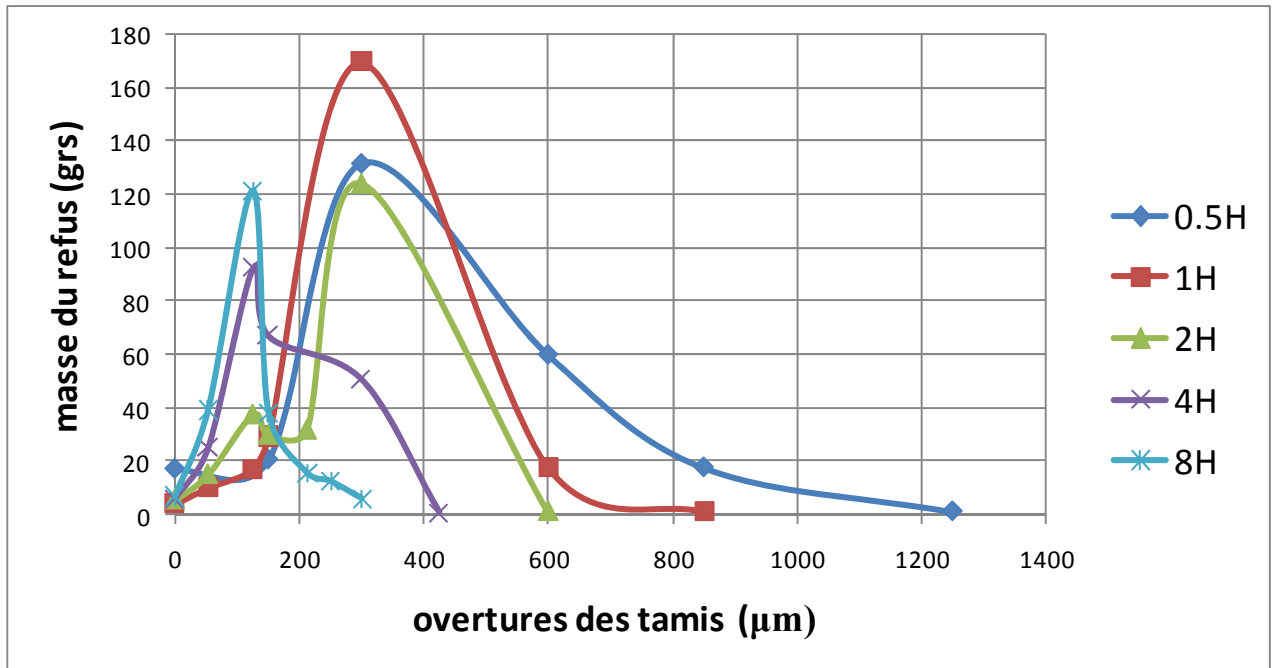


Figure 6.3 distribution de taille après broyage de 0.5, 1, 2, 4,8 heures des copeaux grossiers(charge broyante= 1334 grs, charge broyée= 250grs)

6.3.2. Broyage des copeaux moyens

- Charge broyée 250grs
- Charge broyante 1334 grs
- $D_{mi}=805,36 \mu\text{m}$

Tableau 6 .10 résultats de tamisage après 0.5h de broyage ($D_m=377.07(\mu\text{m})$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
850	1.2	$4.48 \cdot 10^{-3}$
500	39.8	0.16
212	174.2	0.7
125	18.8	0.07
63	0.3	$1.2 \cdot 10^{-3}$
38	5.7	0.02
assiette	7.9	0.03

Tableau 6 .11 résultats de tamisage après 1h de broyage ($D_m=311.05(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
500	1.2	0.03
212	187.5	0.75
150	23.3	0.09
125	12.1	0.04
53	1.8	$7.27 \cdot 10^{-3}$
38	66	0.02
assiette	8.4	0.03

Tableau 6 .12 résultats de tamisage après 2h de broyage ($D_m=278.96(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
500	2.4	$9.58 \cdot 10^{-3}$
212	156.7	0.64
150	36	0.14
125	26.9	0.11
53	2.8	0.01
38	9.2	0.03
assiette	9.5	0.03

Tableau 6 .13 résultats de tamisage après 4h de broyage ($D_m=181.16(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
315	8.2	0.03
300	31.2	0.12
212	37	0.15
150	68.8	0.28
125	48	0.19
53	26.6	0.11
38	10.6	0.04
assiette	10.7	0.04

Tableau 6 .14 résultats de tamisage après 8h de broyage ($D_m=142.4(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
315	1,8	$7.5 \cdot 10^{-3}$
300	6,7	0.02
212	19,1	0.07
150	63,2	0.26
125	74,4	0.31
53	50,3	0.21
38	10,4	0.043
assiette	12.9	0.05

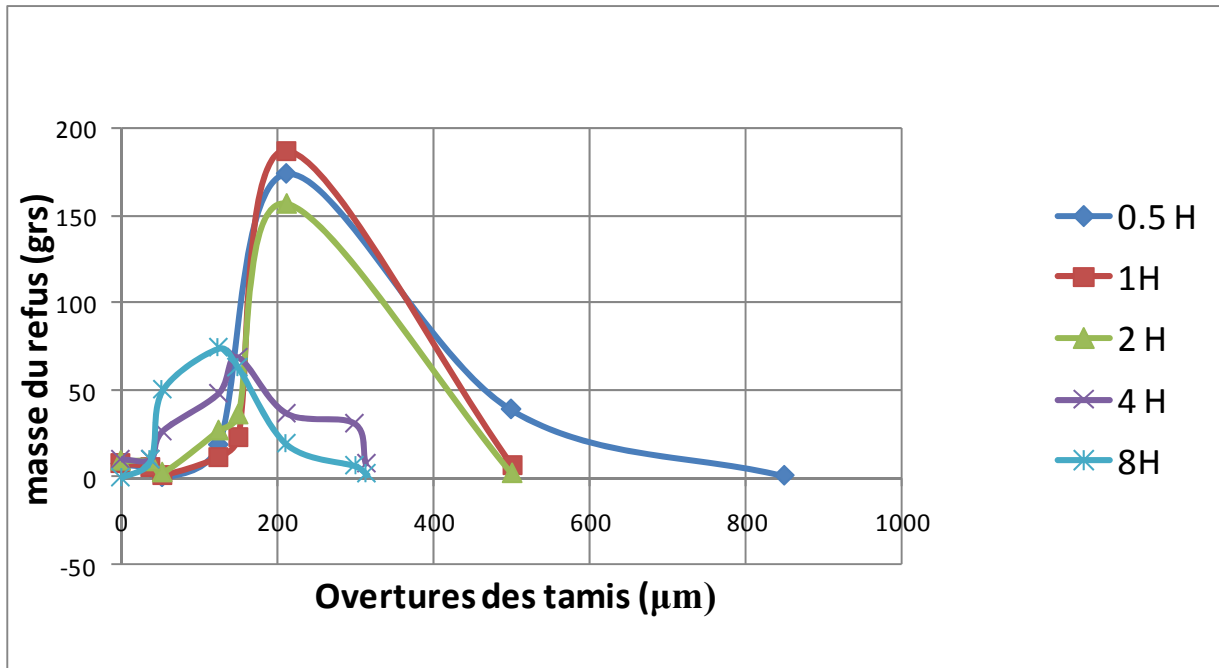


Figure 6.4 distributions de taille après broyage de 0.5, 1, 2, 4,8 heures des copeaux moyens (charge broyante= 1334 grs, charge broyée= 250grs)

6.3.3. Broyage des copeaux fins

- Charge broyée 250grs
- Charge broyante 1334 grs
- $D_{mi}=540 \mu m$

Tableau 6 .15 résultats de tamisage après 0.5h de broyage ($D_m=283.3(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
500	5.5	0.02
300	117.9	0.47
150	79.8	0.19
125	16	0.06
53	20.6	0.08
assiette	7.7	0.03

Tableau 6 .16 résultats de tamisage après 1h de broyage ($D_m=227.7(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
500	0.4	$1.6 \cdot 10^{-3}$
300	60.1	0.24
150	101.1	0.41
125	44.8	0.18
53	30.2	0.12
assiette	9.1	0.03

Tableau 6 .17 résultats de tamisage après 2h de broyage ($D_m=159.67(\mu m)$)

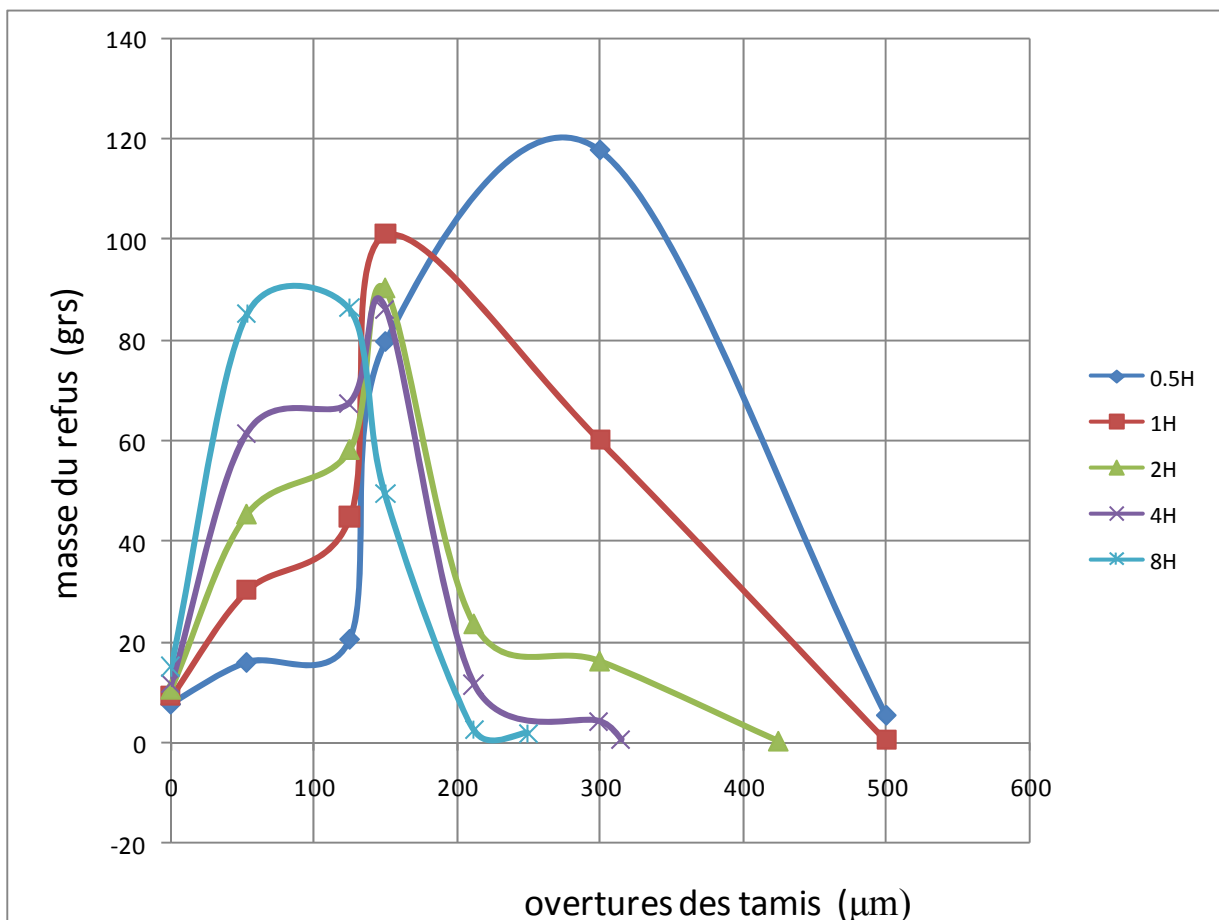
Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
425	0.3	$1.2 \cdot 10^{-3}$
300	16.2	0.06
212	23.6	0.09
150	90.3	0.36
125	58.2	0.23
53	45.4	0.18
assiette	10.6	0.04

Tableau 6 .18 résultats de tamisage après 4h de broyage ($D_m=143.5(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
315	0.5	$2.06 \cdot 10^{-3}$
300	4.1	0.01
212	11.4	0.04
150	86.2	0.35
125	67.5	0.27
53	61.5	0.25
assiette	11.5	0.04

Tableau 6 .19 résultats de tamisage après 8h de broyage ($D_m=122.86(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
250	1.8	$7.4 \cdot 10^{-3}$
212	2.5	0.01
150	49.3	0.2
125	86.3	0.35
53	85.2	0.35
assiette	15.1	0.06

**Figure 6. 5 distributions de taille après broyage de 0.5, 1, 2, 4,8 heures des copeaux fins(charge broyante= 1334 grs, charge broyée= 250grs)**

- Charge broyée 250grs
- Charge broyante 2737grs
- $D_{mi}=540 \mu m$

Tableau 6 .20 résultats de tamisage après 0.5h de broyage ($D_m=235,01(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
500	0,9	$1,8 \cdot 10^{-3}$
425	1,9	$7,6 \cdot 10^{-3}$
300	70,3	0,28
125	138,2	0,55
53	28,7	0,11
assiette	10	0,04

Tableau 6 .21 résultats de tamisage après 1h de broyage ($D_m=157,02(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
300	13,9	0,05
212	26,6	0,1
150	71,9	0,29
125	73,3	0,29
53	49,5	0,2
assiette	11,5	0,04

Tableau 6 .22 résultats de tamisage après 2h de broyage ($D_m=130,7(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
300	1,6	$6,56 \cdot 10^{-3}$
250	2,5	0,01
212	4,7	0,01
150	58,2	0,23
125	87	0,35
53	76,4	0,31
assiette	13,3	0,05

Tableau 6 .23 résultats de tamisage après 4h de broyage ($D_m=113(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
300	0,4	$1,65 \cdot 10^{-3}$
250	0,5	$2,06 \cdot 10^{-3}$
212	1,2	$4,9 \cdot 10^{-3}$
150	31,5	0,13
125	78	0,32
53	111,6	0,46
assiette	18,8	0,07

Tableau 6 .24 résultats de tamisage après 8h de broyage ($D_m=103,01(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
250	0,9	$3,75 \cdot 10^{-3}$
212	2,6	0,01
150	20,3	0,08
125	53,1	0,22
53	139,1	0,57
assiette	24	0,1

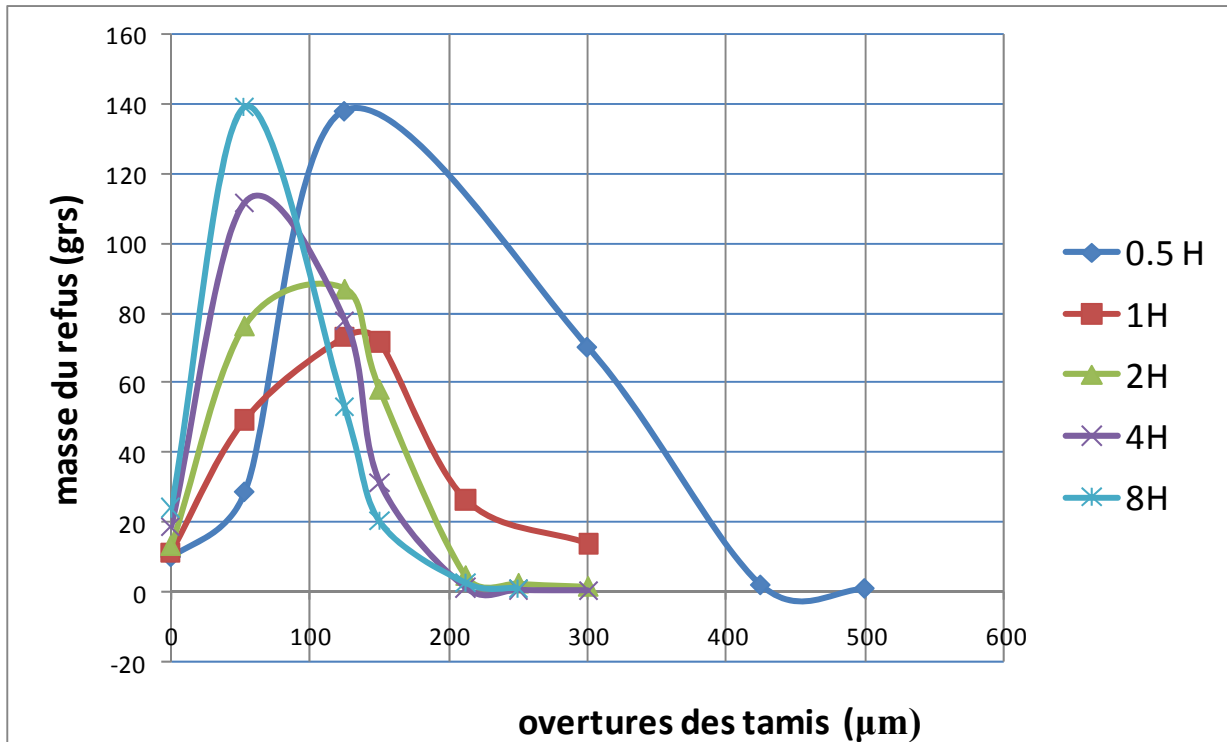


Figure 6. 6 distributions de taille après broyage de 0.5, 1, 2, 4,8 heures des copeaux fins(charge broyante= 2737 grs, charge broyée= 250grs)

- Charge broyée 250grs
- Charge broyante 5572grs
- $D_{mi}=540 \mu m$

Tableau 6 .25 résultats de tamisage après 0.5h de broyage ($D_m=138,28(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
315	1,8	$7,23 \cdot 10^{-3}$
300	6,8	0,02
250	4,6	0,01
212	16,1	0,06
150	38,2	0,15
125	104	0,41
53	61,2	0,24

assiette	15,7	0,06
----------	------	------

Tableau 6 .26 résultats de tamisage après 1h de broyage ($D_m=122,3(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
212	3	0,01
150	59,5	0,24
125	68,5	0,27
53	96,7	0,39
40	6	0,02
20	5,1	0,02
assiette	7,1	0,02

Tableau 6 .27 résultats de tamisage après 2h de broyage ($D_m=106,1(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
212	1,5	$6,19 \cdot 10^{-3}$
150	21,4	0,08
125	50,2	0,2
100	69,4	0,28
53	80,2	0,33
20	11,7	0,03
assiette	7,8	0,03

Tableau 6 .28 résultats de tamisage après 4h de broyage ($D_m=93,36(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
212	1,2	$4,9 \cdot 10^{-3}$
150	7,5	0,03
125	44,9	0,18
100	49,2	0,2
53	115,2	0,47
20	14,7	0,06
assiette	9,0	0,03

Tableau 6 .29 résultats de tamisage après 8h de broyage ($D_m=86,58(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
212	0,6	$2,51 \cdot 10^{-3}$
150	6,5	0,02
125	30,8	0,12
100	36,8	0,15
53	130,8	0,54
20	19,8	0,08
assiette	13,1	0,05

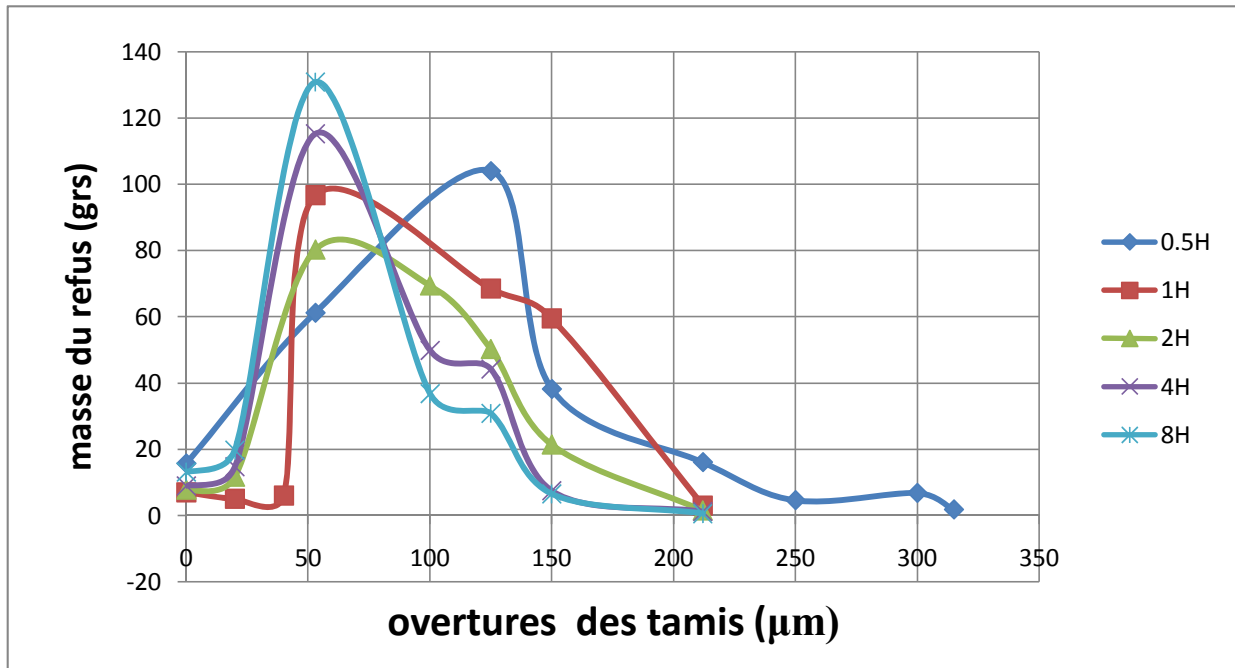


Figure 6. 7 distributions de taille après broyage de 0.5, 1, 2, 4,8 heures des copeaux fins(charge broyante= 5572grs, charge broyée= 250grs)

- Charge broyée 500grs
- Charge broyante 5572grs
- $D_{mi}=540 \mu\text{m}$

Tableau 6 .30 résultats de tamisage après 1h de broyage ($D_m=258,24(\mu\text{m})$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
600	8,6	0,01
425	30,7	0,062
315	110	0,22
212	158,6	0,32
150	65,8	0,13
125	60,2	0,12
53	46,3	0,09
assiette	12,3	0,02

- Charge broyée 750grs
- Charge broyante 5572grs
- $D_{mi}=540 \mu m$

Tableau 6 .31 résultats de tamisage après 1h de broyage ($D_m=295,85(\mu m)$)

Tamis (μm)	Refus (gr)	Fraction %
600	38,8	0,05
425	84,9	0,11
315	236,4	0,31
212	143,1	0,19
150	69,3	0,09
125	59,4	0,07
53	86,7	0,11
assiette	25	0,03

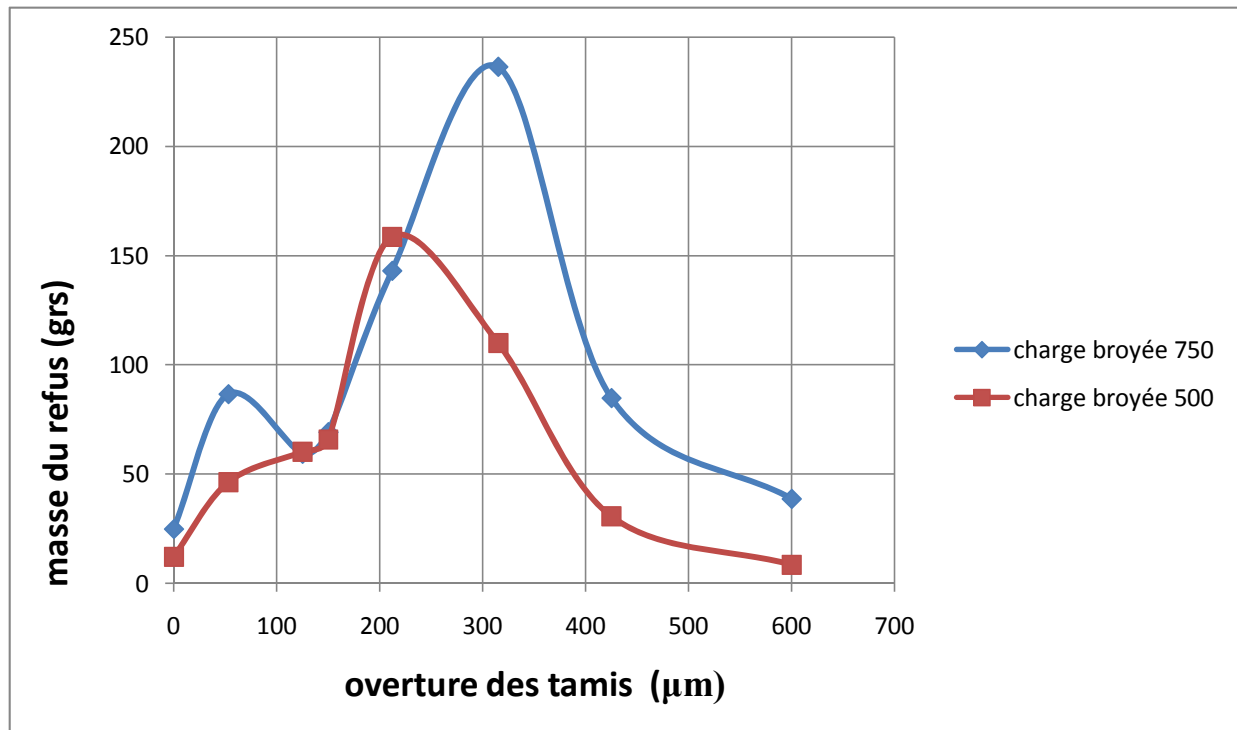


Figure 6. 8 distributions de taille après broyage de 1h charge broyée 500 ,750 grs

6.4. Influence des paramètres de broyage sur la taille moyenne de la poudre broyée

○ Influence du temps de broyage et de la taille du copeau initial

Tableau 6 .32 influence du temps de broyage sur la taille moyenne des particules de poudre grossière (charge broyante=1334 grs, charge broyée=250grs)

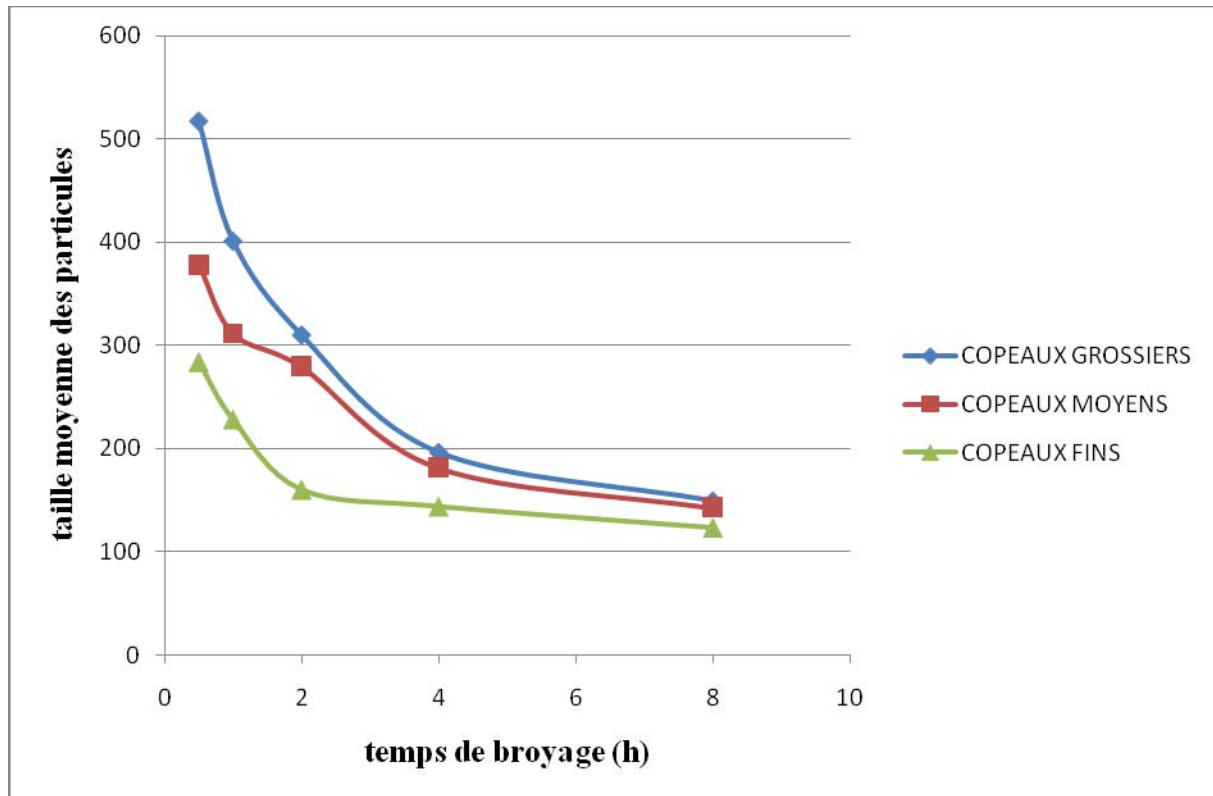
Temps de broyage (h)	Taille moyenne des particules (μm)
0.5	516.99
1	400.9
2	310.06
4	196.6
8	149.6

Tableau 6 .33 influence du temps de broyage sur la taille moyenne des particules de poudre Moyenne (charge broyante=1334 grs, charge broyée=250grs)

Temps de broyage (h)	Taille moyenne des particules (μm)
0.5	377.7
1	311.05
2	278.96
4	181.16
8	142.4

Tableau 6 .34 influence du temps de broyage sur la taille moyenne des particules de poudre Fine (charge broyante=1334 grs, charge broyée=250grs)

Temps de broyage (h)	Taille moyenne des particules (μm)
0.5	283.3
1	227.7
2	159.67
4	143.5
8	122.86



**Figure 6. 9 influences du temps de broyage sur la taille moyenne des particules des poudres
(Grossiers, moyens, fins)**

○ **Influence de la charge broyante**

Taille de copeau initial : 540(μm)

Temps de broyage : 8h

Charge broyée : 250 grs

Tableau 6 .35 influence de la charge broyante sur la taille moyenne des particules de poudre

Charge broyante (grs)	Taille moyenne des particules (μm)
1334	122.86
2737	103.01
5572	86.58

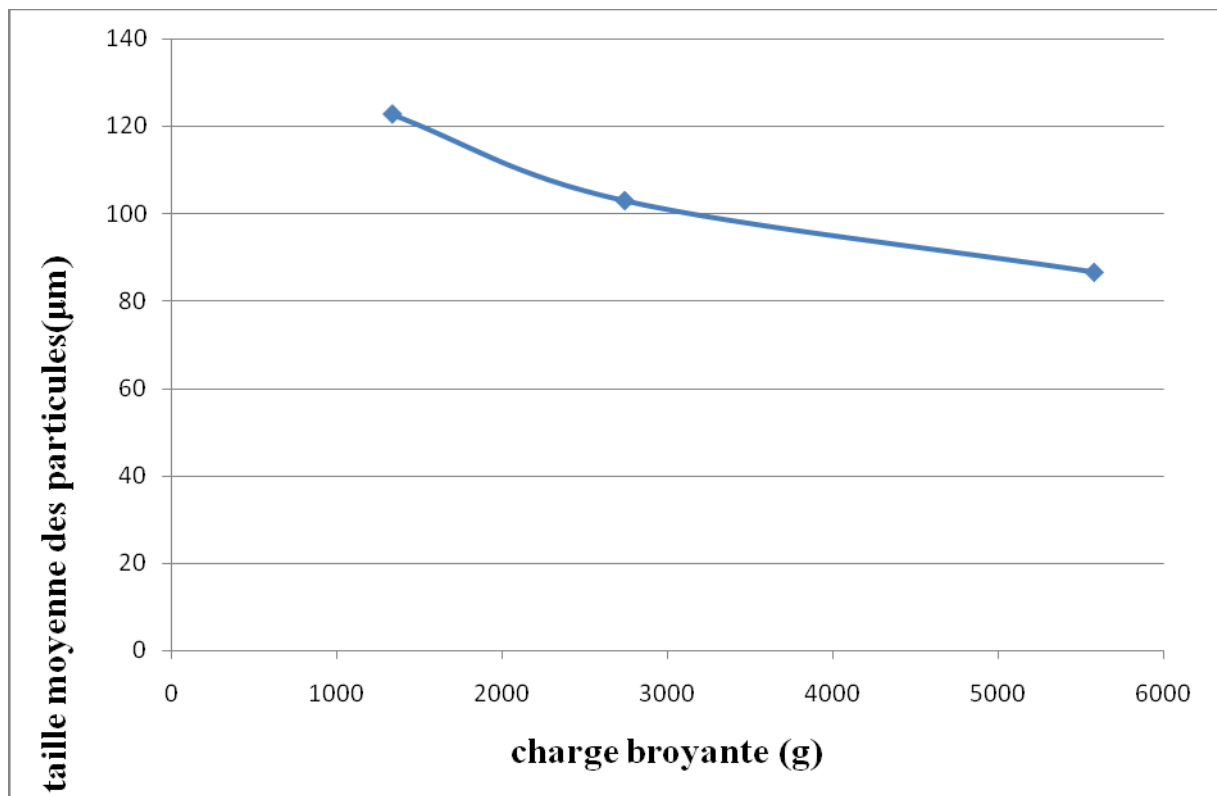


Figure 6.10 influence de la charge broyante sur la taille moyenne des particules de poudre

○ **Influence de la charge broyée**

Temps de broyage : 1h

Charge broyante : 5572 grs

Taille du copeau initial : 540(µm)

Tableau 6.36 influence de la charge broyée sur la taille moyenne des particules de poudre

Charge broyée (grs)	Taille moyenne des particules (µm)
250	122.3
500	258.24
750	295.85

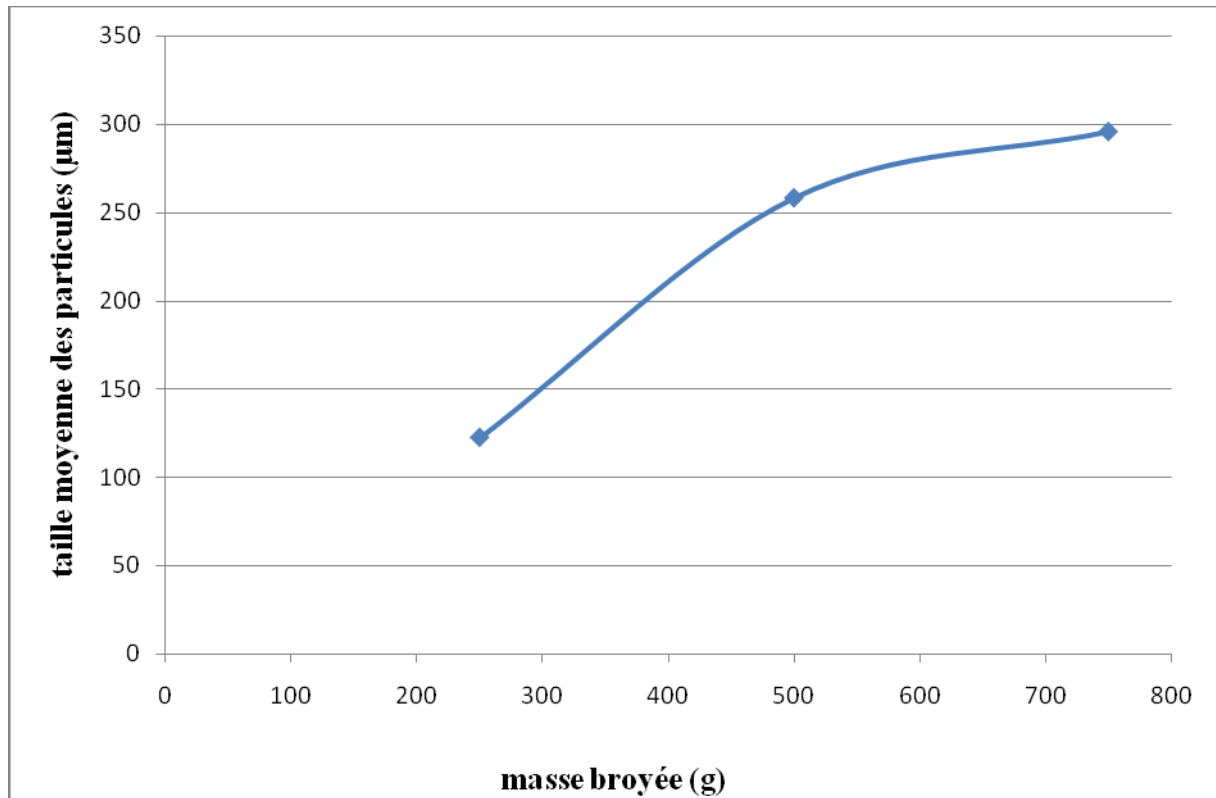


Figure 6.11 influence de la charge broyée sur la taille moyenne des particules de poudre

○ **Influence de la charge broyante sur la masse de la fraction fine**

Temps de broyage : 8h

Charge broyée : 250grs

Tableau 6.37 Influence de la charge broyante sur la masse de la fraction fine

Charge broyante (grs)	Fraction fine (grs)
1334	15,1
2737	24
5572	32,9

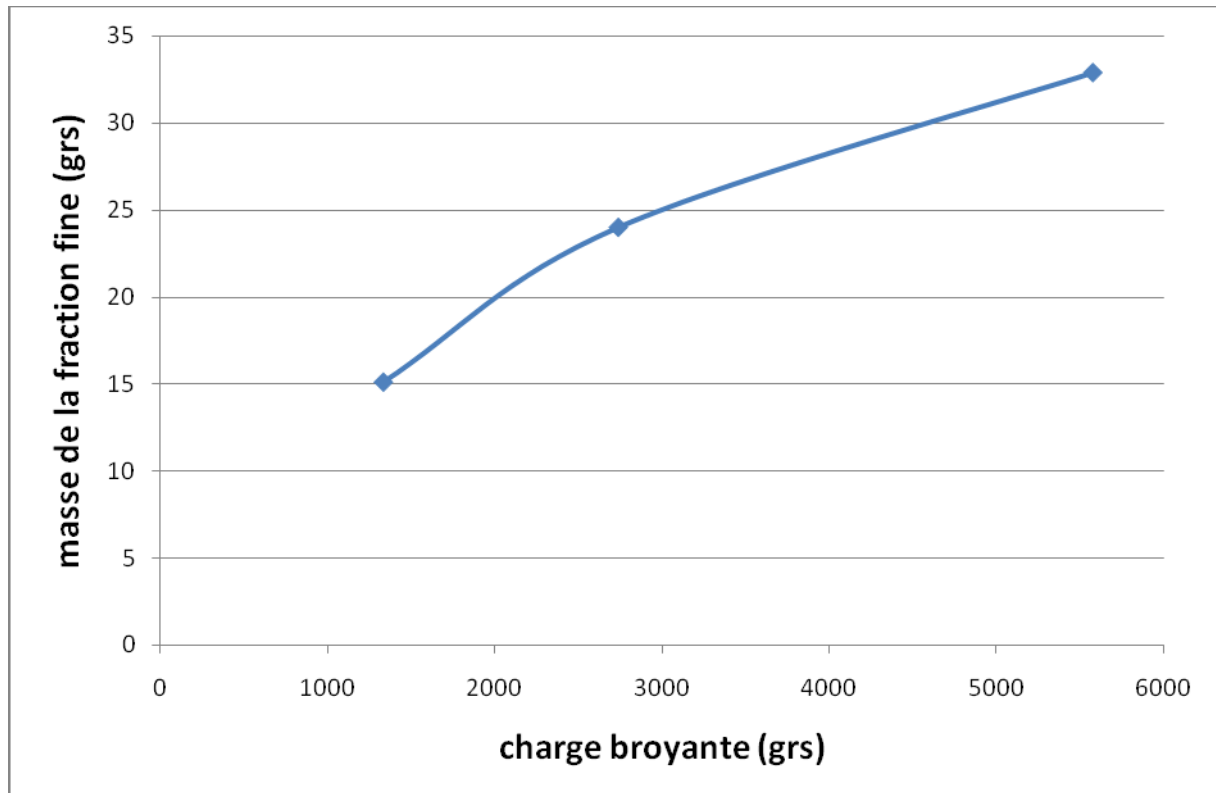


Figure 6.12 Influence de la charge broyante sur la masse de la fraction fine

CHAPITRE : 7

DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

7-1 Introduction

Dans le but de faciliter la compréhension du procédé de broyage, nous devons donner un sens à chaque paramètre ou élément influençant la qualité de la poudre produite. Dans ce sens, il est nécessaire de s'approfondir dans la discussion pour aboutir à l'interprétation adéquate des phénomènes régissant l'expérience, à éclaircir le mécanisme de broyage des métaux et à optimiser les paramètres en vue de présenter cette méthode pour une éventuelle exploitation industrielle dans le domaine de la métallurgie des poudres.

7-2 Influence du temps de broyage et la taille du copeau initial sur la taille moyenne des particules de poudre élaborée:

L'étude de l'influence du temps de broyage permet de juger de l'efficacité de cette opération en comparant les tailles des particules broyées pendant des durées différentes. Il faut noter que toutes les courbes montrant la distribution de taille des particules ont la même allure celle d'une cloche. Ces courbes de distribution sont caractéristiques pour tous les matériaux sous forme de poudre. Elles commencent par un points correspondant à un minimum, s'élèvent jusqu'à un pic correspondant au maximum et redescendent finalement vers un autre minimum, plus ou moins de même niveau que le première. Les minimums représentent les fractions de poudre qui se trouvent retenues dans les tamis de plus grande ouverture d'une part, et la poudre de taille plus fine que la plus fine poudre retenue par le tamis d'ouverture plus petite d'autre part (c.à.d dans l'assiette). Le maximum de la courbe quant à lui représente la plus grande fraction de poudre retenue dans un tamis. Cette fraction représente généralement la taille moyenne de la majorité des particules de poudre. Expérimentalement, on constate que cette fraction est retenue par le tamis du milieu de la série utilisée

La figure (6.9) illustre l'influence du temps de broyage sur la taille moyenne des particules de poudre pour trois gammes de copeau. On remarque alors, qu'elles ont la même allure, elles décroissent en taille très rapidement durant l'intervalle de temps compris entre une demi-heure et deux heures de broyage. Cependant, on peut dire que ces courbes se divisent en deux parties distinctes. La première partie montre la diminution brutale de la taille durant une courte durée de broyage (2h), dans cet intervalle de temps les courbes sont des droites caractérisées par une grande pente. Ceci s'explique par le fait que les copeaux introduits initialement dans la chambre du broyeur sont de taille suffisamment grande pour être pris entre les boulets et parois du broyeur et en subissent l'effet de fracture en l'absence de l'agglomération, donc les particules se fragment rapidement.

La seconde partie correspond à un broyage prolongé, dont l'intervalle de temps est compris entre 2 heures et 8 heures. Ici, les courbes présentent des pentes très faibles, ceci s'explique

par le fait que les copeaux sont transformés totalement en poudre très fine, et ses particules s'agglomèrent entre elles en formant des granules assez grossiers. Aux temps assez longs, les mécanismes de cisaillement et de fracture cessent d'être dominants et sont éventuellement remplacés par un nouveau mécanisme dominant qui est l'attrition. Ici, la poudre étant déjà assez fine, elle possède donc une grande surface spécifique. Cela favorise le phénomène d'attrition grâce à la surface de contact assez importante entre les particules elles mêmes d'une part ; et entre les particules, la charge broyante et la chambre de broyage d'autre part. Dans cette étape, les forces de broyage qui désagglomèrent les particules sont légèrement inférieures aux forces internes de cohésion, ce qui favorise le phénomène d'agglomération qui par ailleurs est indésirable mais inévitable en métallurgie des poudre fines.

Par ailleurs, il convient de remarquer que les trois graphes sont parallèles montrant ainsi l'influence de la taille initial des copeaux sur la taille moyenne des poudres obtenues. Les trois courbes sont parallèles dans un ordre croissant de la taille initial du copeau. Lorsqu'on compare les tailles moyennes des poudres après la même durée de broyage des trois gammes de copeau, on constatera que la taille moyenne augmente dans le sens de l'augmentation de la taille du copeau, cela peut être expliqué de la manière suivante :

D'une part les trois gammes de copeau sont broyées dans les mêmes conditions (charge broyante, charge broyée, temps de broyage), ce qui fait que l'apport d'énergie est le même pour les trois gammes de copeau, d'autre part la surface superficielle est différente pour les trois type de copeau, entraînant un excès d'énergie croissant dans le sens de la diminution de la taille des copeaux, donc la fracture des copeaux fins est plus rapide que celle des copeaux grossiers. La différence de taille est montrée dans les micrographies de la figure suivante :

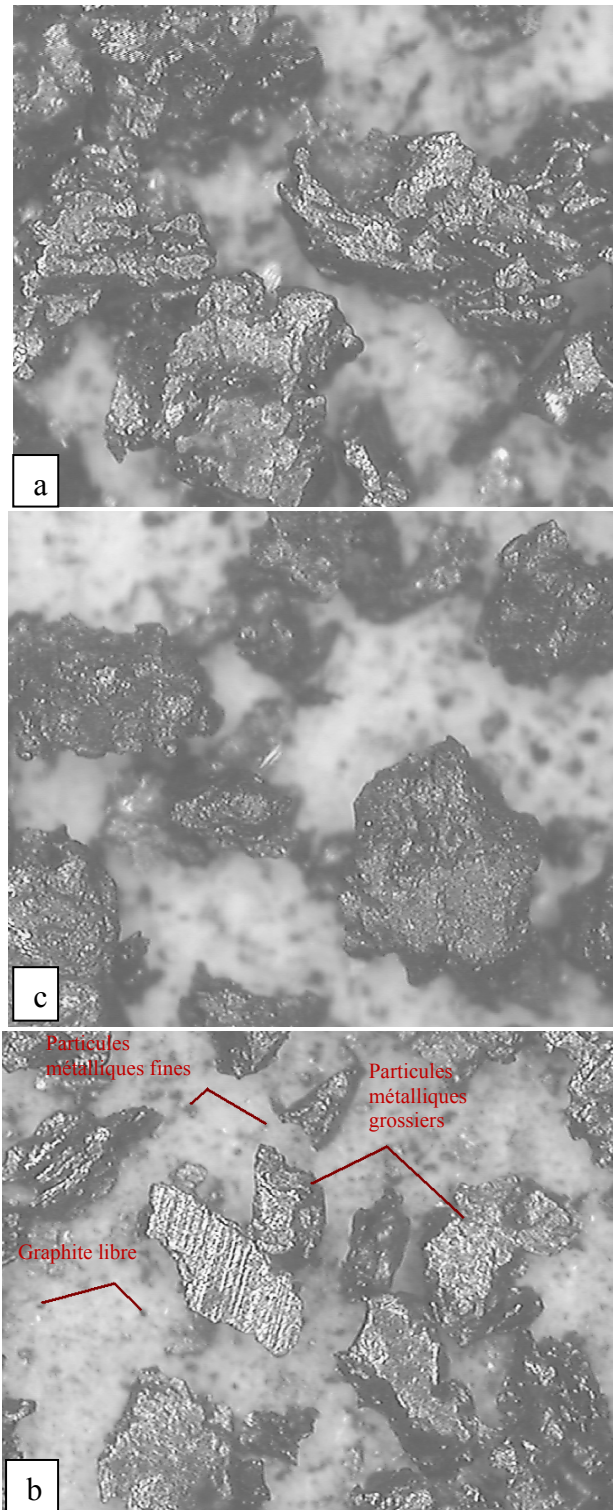


Figure 7.1. Micrographies montrant la forme et la taille des particules obtenues à partir des différentes gammes des copeaux après 8 heures de broyage (a-copeau grossier, b-copeau moyen, c-copeau fin) ; G=50X.

La figure 7.1a montre des particules métalliques grossières de forme irrégulière avec présence de graphite aux abords ainsi que de fines particules de forme en flocon dues à l'écaillage des grandes particules provoqué par le phénomène de l'attrition évoqué précédemment. Ces grosses particules contiennent des fissures qui vont certainement se propager et conduire inévitablement à la fracture créant ainsi de nouvelles particules.

La figure 7.1b montre presque les mêmes formes de particules et de graphite que la figure précédente, sauf que la taille des particules est plus réduite avec une densité des fissures qui est moins importante.

La figure 7.1c montre les mêmes motifs morphologiques que les deux premières figures, sauf que la taille des particules est encore plus fine et la densité des fissures est très faible. La variation de la densité des fissures peut être expliquée par le fait que les grosses particules ont un volume plus important donc une capacité d'écrasement plus importante que les particules fines, ce qui explique leurs aptitudes à la fracture par division en fines autres particules.

7.3 Influence de la charge broyante sur le produit broyé

Lors du broyage des copeaux fins, on a utilisé trois gammes de charge broyante (1334 ; 2737 et 5572grammes). Le but de cette variation est de mettre en évidence l'influence de la charge broyante sur le processus de broyage. De la figure (6.10), on remarque que la taille moyenne de la poudre produite diminue dans le sens de l'augmentation de la charge broyante, ceci s'explique par le fait que :

- La surface de contact poudre-boulets n'est pas la même dans les trois expériences ce qui fait qu'en augmentant la charge broyante la surface de contact poudre-boulets augmente et la quantité de poudre présente entre les boulets et les parois augmente aussi.
- Aussi, le choc reçu par les particules de poudre au cours de la chute des boulets, est plus important dans le cas des grandes charges que dans celui des plus petites charges

La différence de taille pour les trois charges broyantes est montrée dans la figure suivante :

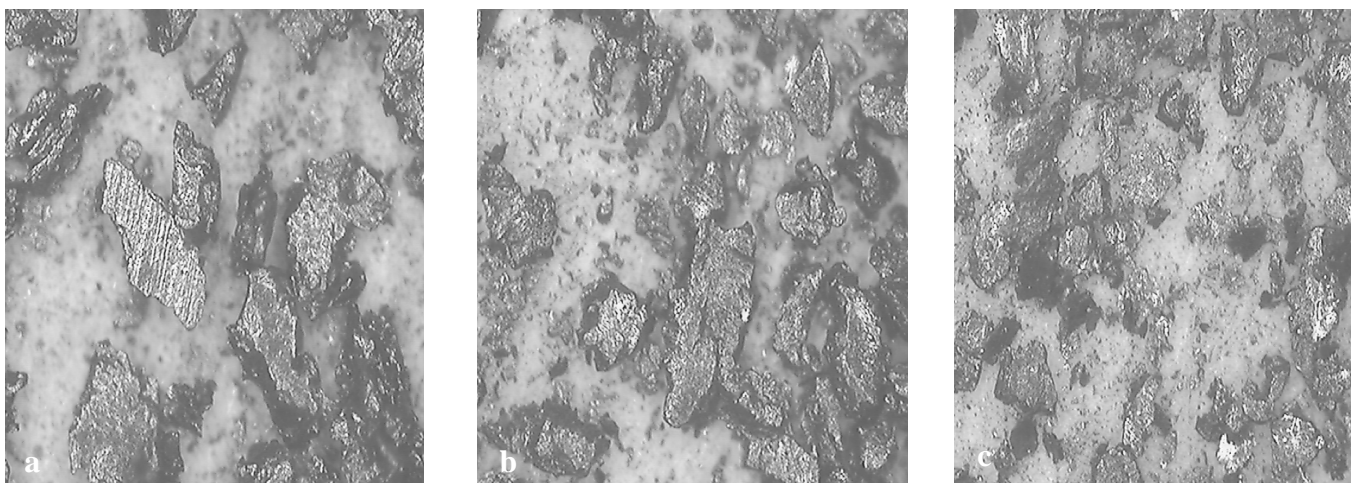


Figure 7.2. Micrographies montrant la forme et la taille des particules de différentes gammes de charge broyante après 8 heures de broyage (a=1334 grs, b=2773 grs, c=5572grs) ; G=50X.

La figure (7.2) met en évidence des particules métalliques de forme irrégulière avec présence de graphite aux abords et de petites particules de forme en flocon, sauf que la taille des particules métalliques diminue dans le sens de l'augmentation de la charge broyante. Aussi, la quantité de graphite libéré augmente, ceci s'explique par le fait que le choc reçu dans le cas d'une grande charge est plus grand que quand la charge est petite ce qui favorise la fracture des particules et la libération du graphite.

7.4 Influence de la charge broyée

Pour mettre en évidence l'influence de la charge broyée sur la taille moyenne des particules on a broyé trois masses de copeau (250, 500 et 750 grammes), pendant une heure de broyage. En partant des résultats obtenus montrés par les courbes de la figure (6.11), on remarque que la taille moyenne des particules augmente dans le sens de l'augmentation de la charge broyée. On peut expliquer cette variation de la manière suivante :

- Le remplissage des espaces entre les boulets ou entre les boulets et les parois du broyeur se fait d'une manière différente pour les trois charges de copeaux. Ce qui fait qu'en augmentant la masse broyée, le nombre des particules prises entre deux boulets est plus grand, ce qui amortit le choc subi par chaque particule individuelle. Ainsi, la probabilité qu'une particule soit prise et fragmentée entre les boulets et les parois de la chambre de broyage se trouve assez diminuée, ce qui conduit à l'obtention d'une poudre grossière.
- Les chocs reçus par les particules de poudre au cours de la chute des boulets sont plus importants dans le cas des petites charges à broyer que quand la charge est plus grande. D'une autre manière, il y a une plus grande capacité à absorber et à dissiper le choc pour une grande masse que pour une petite masse, d'où l'explication des résultats obtenus.

7.5 Evolution de la fraction fine lors du broyage

La fraction fine représente la masse de particules dont la taille est inférieure à la plus petite ouverture de tamis utilisé (soit 53 μ 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.

La figure (6.12) représente l'influence de la charge broyante sur la fraction fine de la poudre. On constate d'après cette figure que la fraction fine augmente dans le sens de l'augmentation de la charge broyante, on peut expliquer cette variation par la manière suivante :

On sait que le matériau utilisé dans notre cas est une fonte GS. C'est un matériau dur qui contient des nodules de graphite liés mécaniquement dans une matrice de perlite et de lédéburite (perlite+cémentite) comme le montre la structure initiale du matériau dans la

figure 6.1. Ce phénomène favorise une hétérogénéité qui facilite la séparation de ces trois constituants (perlite, cémentite et graphite) pendant le broyage. Sachant la dureté élevée de la cémentite et même de la perlite, il est donc attendu que ce matériau soit plus fragile et apte à la désintégration qu'un matériau tendre et ductile, d'où la fraction fine assez importante obtenue durant cette élaboration. Par ailleurs, la fraction de poudre fine contient une proportion de graphite assez grande à cause justement de sa faible liaison avec la matrice d'une part mais aussi à cause de sa faible dureté d'autre part. Dans la fraction fine, la libération du graphite est plus grande dans le cas d'une grande charge broyante. Ceci s'explique par le fait que les chocs reçus par les particules sont plus importants, conduisant donc à vider rapidement la matrice métallique de presque tout le graphite contenu en son sein.

Le reste de la fraction fine est composé par de fines particules métalliques en forme de flocon qui se produisent par l'écaillage des grosses particules durant le dernier stade de broyage dominé par le mécanisme d'attrition. Ces flocons représentent une petite proportion dans la masse de poudre élaborée.

7.6 Optimisation du procédé

Généralement, en métallurgie des poudres, l'objectif recherché est l'obtention d'une poudre aussi fine que possible. Ainsi, après les différentes manipulations et expériences, on est arrivé au constat suivant : L'obtention d'une poudre fine ($<53 \mu\text{m}$) est conditionnée par l'utilisation des paramètres suivants :

- Une charge broyante maximale
- Une charge broyée minimale
- Un temps de broyage maximal et
- Une taille du copeau initial aussi fine que possible

CONCLUSION GENERALE

L'intérêt capital recherché dans ce travail, a été l'élaboration d'une poudre de fonte par broyage mécanique 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, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le temps favorise la désintégration des particules de poudres dans l'intervalle où les phénomènes prédominant sont la fragmentation, la fracture, sinon l'effet s'inverse pour favoriser l'agglomération des particules de poudre fines.
- La taille du copeau initial influence la qualité du broyage. Ainsi il faut plus de temps pour atteindre une moyenne de taille fine de la poudre dans le cas des copeaux plus grossier.
- La charge broyante qui en augmentant, augmente l'efficacité du broyage par le fait que les chocs augmentent dans le sens de l'augmentation de la charge.
- La taille moyenne de la poudre augmente avec l'augmentation de la masse broyée. Ce qui est un facteur défavorable pour la production des poudres fine en grande quantité.
- Un bon rendement en matière de taille des particules est obtenu pendant les deux premières heures de broyage. Un broyage prolongé ne permet pas de réduire davantage la taille moyenne, mais en revanche il permet d'augmenter la fraction de la taille fine.

Propositions pour travaux ultérieurs

A l'issue de ce travail pratique, nous proposons de le compléter par les travaux suivants :

1. Séparer les particules métalliques de celles du graphite par un tamisage approprié
2. Procéder à l'analyse chimique des particules de poudres obtenues afin d'évaluer le degré de contamination de la poudre lors du broyage mécanique
3. Evaluer et nommer les nouvelles phases en présence pour déterminer la nuance et la nature de la poudre élaborée (fonte ou acier ?)
4. Faire les traitements thermiques qui s'imposent, afin de réduire le taux d'écrouissage et rendre la poudre plus ductile et donc plus apte au compactage à froid.
5. Eliminer la couche d'oxyde qui s'est formée éventuellement sur la surface extérieure des particules pour faciliter la diffusion lors du frittage à haute température.

References bibliographiques

- [1] **R.MEYER**, « Poudres Métalliques, Techniques de l'ingénieur », Fasc. M862, 2003.
- [2] **D.Bouvard**, « Métallurgie des poudres », Edition Hermès Science, Paris, 2002, pp 17-29.
- [3] **C.Chaussin; G.Helly**, « Elaboration des métaux », Ed dunod, Tome 2, 1984.
- [4] **R. Kieffer ; W. Hotop**, « Fer et Acier Frittés », Ed dunod, 1959.
- [5] **G.Cizeron**, « La revue de Métallurgie/Science et Génie des Matériaux », Mai 1994, pp 683-692.
- [6] **A.J.Yule, J.J.John**, « Atomization of Metals for Powder Production and Spray Deposition », Oxford University Press, 1994.
- [7] **M.Senna, H.Kuno**, « Polymorphic transformation of PbO by isothermal wet ball milling », J. Am. Ceram. Soc, Vol 54 N°5, May 1971.
- [8] **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
- [9] **Griffith, A.A, Trans.Roy**. Royal Soc. London, Vol A 221, 1921, p 163.
- [10] **J.J, Gilvarry, B.M, Borgstrom**, « Fracture and comminution of brittle solids » AIME Trans, vol 220, 1961, p 380.
- [11] **M. Grafoute**, « Etude des propriétés structurales et modélisation de poudres nanostructurées de fer obtenue par broyage mécanique », thèse doctorat, université de Maine, 2004, pp 17-23
- [12] **Harris, C.C**, « ON The Limit of Comminution », Trans. Soc. Mining Eng, March 1967, p17-30.
- [13] **S.GALDEANO**, « Influence des conditions de broyage sur la distribution de nanoparticules magnétiques (Fe,Co) dans une matrice de cuivre », thèse doctorat, université de Paris 7, 2001, p 10-16
- [14] **Arias, A**, « Oxide dispersion Strengthened Nickel Produced by non reactive milling », NASA TMX-3331, Jan 1976.
- [15] **Arias, A**, « Chemical Reactions of Metal powders with organic inorganic Liquids during Ball milling ». NASA TN D-8015, Sept 1975.
- [16] **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.

[17] **Rose, E. and Sullivan, R.M.E**, « A Treatise on Rite Internal Mechanics of Ball, Tube, Rod Mills», CHEmical Publishing Co, New York, 1958.

[18] **U.s Patent 4 115 107**, Sept 1978.

[19] **R. OURAHMOUNE, .A.Kasser**, « Elaboration et Caractérisation d'une Poudre de bronze obtenue par Broyage Mécanique des Copeaux d'Usinage », Mémoire de Magistère, ENP, 2006, pp 11-12.

[20] **P.BASTID**, « Comportement thermomécanique des fontes a graphie sphéroïdale pour collecteur d'échappement », thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines de paris, 1995, p 3-7