

9/03

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Ecole Nationale Polytechnique.

Département métallurgie
PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة —
BIBLIOTHEQUE —
Ecole Nationale Polytechnique

**CONCEPTION ET REALISATION
D'UN BROYEUR A LAMES ET
ELABORATION DE POUDRE DE
BRONZE**

Proposé et dirigé par :

Dr A. M. KASSER

Etudié par :

R. OURAHMOUNE

PROMOTION 2003

10, Avenue Pasteur, BP N° 182 El-Harrache Alger Algérie

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.



Ecole Nationale Polytechnique.

Département métallurgie
PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

**CONCEPTION ET REALISATION
D'UN BROYEUR A LAMES ET
ELABORATION DE POUDRE DE
BRONZE**

Proposé et dirigé par :

Dr A. M. KASSER

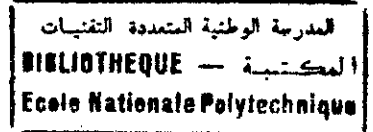
Etudié par :

R. OURAHMOUNE

PROMOTION 2003

10, Avenue Pasteur, BP N° 182 El-Harrache Alger Algérie

DEDICACES



A la memoire de mon grand père

A mes chers parents

A ma grand mère

A mes frères Walid, Adel et djalilou

A mes oncles et mes tantes

A ma Kika

A toute ma famille

A tous ceux qui comptent pour moi.

Remerciements

Je tiens à remercier vivement Mr M. Kasser mon promoteur pour son aide précieuse, ses conseils, ses orientations, sa patience et ses sacrifices pour le bon accomplissement de ce travail.

Je remercie tous les membres du jury d'avoir accepté de siéger mon jury.

Mon oncle Boulenouar trouve ici mes sincères remerciements pour son aide très utile.

Je remercie également Mr Saada et Mr Ait Hamou pour nous avoir laissé libre accès au laboratoire génie minier.

Je ne peux oublier de remercier tous les gens qui m'ont aidé à la réalisation de ce projet.

Résumé:

Le travail présenté dans cette thèse, est une recherche dans le domaine d'élaboration de la métallurgie des poudres. La méthode d'élaboration adoptée ici est le broyage mécanique. Pour cela, nous avons conçu et réalisé un broyeur à lames tranchantes pour produire des poudres métalliques à partir du recyclage des copeaux d'usinage.

Ainsi, par cette méthode des copeaux de bronze ont été pulvérisés en une poudre fine sous l'action de quatre variables de broyage qui sont : le temps de broyage, la masse broyée des copeaux, la taille initiale des copeaux et la vitesse de rotation des outils broyants.

L'optimisation des paramètres de broyage a permis de dégager les conditions idéales qui permettent l'obtention d'un produit broyé de qualité en termes de taille et de forme des particules. Ceci grâce au contrôle facile des variables de broyage.

Finalement, une étude comparative entre ce broyeur à lames et le broyeur à boulets est faite, pour comprendre la performance de l'un et de l'autre. Le résultat a montré que pour des conditions identiques de broyage, le rendement du broyeur à lames en terme de la fraction fine de la poudre est beaucoup plus grand que celui du broyeur à boulets.

Les mots clés : La métallurgie des poudres; poudres métalliques; élaboration des poudres; le broyage; broyeur; broyeur à lames; broyeur à boulets; tamisage; caractérisation de poudre; les bronzes; atomisation; désintégration; fragmentation.

SOMMAIRE

Partie I : Revue bibliographique.

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre 1 ELABORATION DES POUDRES METALLIQUES.....	3
1.1 INTRODUCTION.....	3
1.2 LES PROCEDES PHYSIQUES.....	3
1.2.1 L'atomisation.....	3
1.2.2 Le procédé DPG.....	4
1.2.3 Le procédé d'hydrogène dissous.....	5
1.2.4 Le procédé de l'électrode tournante.....	5
1.3 LES PROCEDES CHIMIQUES.....	6
1.3.1 Le procédé de réduction des oxydes.....	6
1.3.2 Le procédé de décomposition des métaux carbonyles.....	6
1.4 LE PROCEDE ELECTROLYTIQUE.....	7
1.5 LE PROCEDE MECANIQUE.....	7
Chapitre 2 LE BROYAGE MECANIQUE.....	9
2.1 INTRODUCTION.....	9
2.2 LES PRINCIPES DE BROYAGE.....	10
2.2.1 La fracture fragile.....	10
2.2.2 Le broyage ultrafin des matériaux durs et fragiles.....	12
2.2.3 Le broyage des particules individuelles.....	13
2.3 LES PARAMETRES DE BROYAGE ET LES CARACTERISTIQUES DES POUDRES.....	16
2.3.1 La relation de l'énergie.....	19
2.3.2 Les processus de broyage.....	20
2.3.2.1 Micro forgeage.....	21
2.3.2.2 Fracture.....	22
2.3.2.3 L'agglomération.....	22
2.3.3 Mécanisme de broyage.....	22
2.4 LES EQUIPEMENTS DU BROYAGE.....	25
2.4.1 Broyeur à boulets Tumbler.....	25
2.4.1.a Les paramètres d'un broyeur à boulets.....	26
2.4.2 Les broyeurs à attrition.....	27
2.4.2.a Le mécanisme du broyeur à attrition.....	28
2.4.3 Le processus d'impact Coldstream.....	29
2.4.4 Le broyeur à haute énergie.....	31
2.4.5 Les broyeurs à marteau et à cylindre.....	31
2.4.6 Les broyeurs à vibration de boulets.....	32

2.4.6.1	Le broyeur à tube vibratoire.....	32
2.4.6.2	Le broyeur à vibration SWECO.....	35
CHAPITRE 3 LES BRONZES.....		37
3.2	DIAGRAMME D'EQUILIBRE CU-SN.....	37
3.3	PROPRIETES PHYSIQUES DES BRONZES.....	39
3.4	CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES BRONZES.....	39
3.4.1	Caractéristiques de traction et de dureté.....	39
3.4.2	Constantes d'élasticité.....	40
 Partie II : PROCEDURE EXPERIMENTALE		
CHAPITRE 4 CONCEPTION ET REALISATION D'UN BROYEUR.....		42
4.1	INTRODUCTION.....	42
4.2	DESCRIPTION DU BROYEUR.....	42
4.3	CONCEPTION ET REALISATION DES DIFFERENTES PIECES DU BROYEUR.....	42
4.3.1	La chambre de broyage.....	42
4.3.2	La roue de broyage.....	43
4.3.3	Les outils de broyage mobiles.....	43
4.3.4	Le couvercle.....	43
 CHAPITRE 5 ELABORATION DES POUDRES ET OPTIMISATION DES PARAMETRES DE BROYAGE.....		54
5.1	INTRODUCTION.....	54
5.2	BUT DE CE TRAVAIL.....	54
5.3	DESCRIPTION DES OPERATIONS.....	55
5.3.1	Fabrication des copeaux.....	55
5.3.2	Caractérisation des copeaux.....	55
5.3.3	Présentation de l'opération de broyage.....	56
5.3.4	Description de la balance électronique.....	56
5.3.5	Description des tamis.....	56
5.3.6	Description du vibreur à tamis.....	56
5.3.6	Décapage des surfaces des particules de poudre.....	57
 CHAPITRE 6 PRESENTATION DES RESULTAS.....		58
6.1	CARACTERISATION DES COPEAUX.....	58
6.2	RESULTAT DU BROYAGE DES COPEAUX D'USINAGE.....	59
6.2.1	Etude de l'influence du temps de broyage et de la masse initiale des copeaux.....	60
6.2.1.1	Broyage des copeaux a taille initiale moyenne.....	60

6.2.2	Etude de l'influence de la taille initiale des copeaux.....	69
6.2.2.1	Broyage de copeau à taille initiale grossière.....	69
6.2.2.2	Broyage de copeau à taille initiale fine.....	70
6.2.3	Étude de l'influence de la vitesse de broyage.....	71
6.3	INFLUENCE DES PARAMETRES DE BROYAGE.....	73
6.3.1	Influence du temps du broyage sur la taille des particules.....	73
6.3.2	Influence de la masse initiale des copeaux sur la taille des particules.....	75
6.3.3	Influence de la taille moyenne des copeaux sur la taille des particules.....	76
6.3.4	Influence de la vitesse de broyage sur la taille des particules.....	77
6.4	EVOLUTION DE LA FRACTION FINE.....	78
6.4.a)	Par rapport au temps de broyage.....	78
6.4.b)	Par rapport à la masse initiale des copeaux.....	79
6.4.c)	Par rapport à la taille initiale des copeaux.....	80
6.5	COURBES DE COMPARAISON ENTRE LE BROYEUR À LAMES ET LE BROYEUR À BOULETS.....	81
6.5.a	Influence du temps de broyage.....	82
6.5.b	Influence de la masse initiale des copeaux.....	83

CHAPITRE 7 INTERPRETATION DES RESULTATS.....85

7.1	INTRODUCTION.....	85
7.2	INFLUENCE DU TEMPS DE BROYAGE.....	85
7.3	INFLUENCE DA LA MASSE INITIALE DES COPEAUX.....	87
7.4	INFLUENCE DE LA TAILLE INITIALE DES COPEAUX.....	88
7.5	INFLUENCE DE LA VITESSE DE BROYAGE.....	88
7.6	INTERPRETATION DE L'EVOLUTION DE LA FRACTION FINE.....	89
7.6.a	Par rapport au temps de broyage.....	89
7.6.b	Par rapport à la masse initiale des copeaux.....	90
7.6.c	Par rapport à la taille initiale des copeaux.....	90
7.6.d	Par rapport à la vitesse de broyage.....	90
7.7	COMPARAISON ENTRE LE BROYEUR A LAMES ET LE BROYEUR A BOULETS.....	90
7.8	ANALYSE DE LA FORME DE LA POUDRE OBTENUE.....	91
7.8.1	Influence du temps de broyage sur la forme de la poudre.....	91
7.8.2	Répartition de la forme des particules de poudre dans les tamis.....	94
7.9	EQUATION PARAMETRIQUE DE SIMULATION.....	97
7.10	OPTIMISATION DU PROCEDE.....	97
	CONCLUSION GENERALE.....	98

INTRODUCTION GENERALE

La métallurgie des poudres est l'une des plus importantes filières de la métallurgie générale. Son industrie a connu durant la dernière décennie une croissance de 7 à 10 % par an. Une telle croissance est due essentiellement à d'importants développements technologiques qui ouvrent la voie à une utilisation plus large des produits découlant de cette technique de mise en forme. La métallurgie des poudres est non seulement attrayante pour les applications où aucune autre méthode ne peut être utilisée, par exemple pour la mise en forme de matériaux à haut point de fusion ou la fabrication d'outils de coupe au carbure de tungstène ; mais aussi dans les cas où on veut produire un grand nombre de pièces fabriquées par un procédé simple et économique tel celui de la métallurgie des poudres. Dans le contexte de l'utilisation de plus en plus importante de senseurs, par exemple les freins ABS ou autres équipements reliés à la sécurité, on retrouve maintenant des pièces faites d'acier inoxydable et d'autres alliages non-ferreux qui sont généralement fabriqués par métallurgie des poudres. Par ailleurs, la possibilité d'obtenir des pièces à haute densité permet maintenant de produire des pièces à haute performance pour les moteurs et transmissions d'automobiles. En parallèle au développement de la composition chimique des poudres métalliques qui deviennent de plus en plus spécialisées (aciers auto-trempants, applications magnétiques, composites à matrice métallique, mélanges pour pressage à chaud), les presses mécaniques et hydrauliques sont devenues plus sophistiquées et performantes de telle sorte qu'il est maintenant possible de produire des pièces à géométrie variables.

Pour fabriquer une pièce par métallurgie des poudres, on passe par deux étapes essentielles : la première consiste au choix de la technique et le procédé d'élaboration de la poudre, la seconde est celle des méthodes de mise en forme et frittage des pièces comprimées.

Pour l'élaboration des poudres métalliques, plusieurs méthodes ont été développées : parmi ces procédés on peut distinguer :

Les méthodes physiques, appelées souvent *atomisation*, qui consistent en la pulvérisation d'un écoulement vertical de métal fondu 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). Le choc entre le métal liquide et le fluide atomiseur permet l'obtention de poudres de métaux ou d'alliages. Les particules peuvent être sphériques dans le cas d'une atomisation à gaz ou irrégulières dans le cas d'une atomisation à l'eau. Leur taille variant de 10 à 500 μm . Les utilisations de ce procédé sont diverses: atomisation du fer et ses alliages, de l'aluminium et ses alliages, du cuivre et ses alliages, des superalliages de nickel, du cobalt, du plomb, de l'étain... etc.

Les procédés électrolytiques appelés couramment électrodéposition par électrolyse des solutions aqueuses en utilisant des densités de courant de l'ordre de 9 A/m². Cette méthode est utilisée pour les métaux tels que (Cu, Zn, Ag, Fe, ...etc).

Les procédés chimiques sont ceux basés sur la précipitation du métal en solution ammoniacale d'hydroxyde, lesquels par calcination à l'air sont transformés en oxydes anhydres (ZrO , Al_2O_3 ,...), ou à partir des solutions des sulfates métalliques ($FeSO_4$, $CuSO_4$ etc).

Les méthodes mécaniques sont utilisées essentiellement pour les matériaux fragiles. Si le matériau est ductile on utilise un traitement de fragilisation préalable par une diffusion d'hydrogène, ou en utilisant des pré alliages fragiles ($Fe-Si$, $FeAl$, $FeNi$,...). Cette méthode est basée sur la réduction en poudres par choc et abrasion, en utilisant des broyeurs tels que le broyeur à mâchoires, à boulets, à marteaux,...etc.

Dans le travail de recherche présenté dans cette thèse, nous avons fait l'étude, la conception puis la réalisation d'un broyeur à lames. Dans cette étude, l'idée principale nous a été inspirée à partir d'un robot de cuisine qui utilise des outils (lames) pour désintégrer les aliments de consommation. A partir de cette idée, nous avons adopté notre machine avec des outils tranchants mobiles et fixes pour transformer à grande vitesse de rotation les copeaux d'usinage en fines particules de poudre. Le résultat de broyage est très satisfaisant, dans la mesure où la fraction fine de poudre obtenue par ce nouveau broyeur est plus grande que celle des autres broyeurs en usage dans les laboratoires. Une étude comparative des performances entre certains broyeurs est présentée pour montrer cette différence.

CHAPITRE 1

ELABORATION DES POUDRES METALLIQUES

1.1 INTRODUCTION :

Les étapes de fabrication des pièces métalliques par la métallurgie des poudres dépendent essentiellement des caractéristiques de la poudre en question, telles que la taille moyenne et la forme de la particule ainsi que la distribution de taille.

Les caractéristiques des particules diffèrent selon les procédés de fabrication de la poudre qui peuvent être classés en quatre groupes essentiels:

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

1.2 LES PROCEDES PHYSIQUES

Les procédés physiques de production des poudres métalliques sont basés sur la désintégration d'un jet de métal liquide en utilisant un fluide atomiseur. La solidification rapide des gouttelettes liquides dans l'espace transforme le métal liquide à masse initiale continue en une masse de poudre à particules fines discontinues. Cette façon de produire des poudres est appelée atomisation. Le fluide atomiseur peut être un gaz ou un liquide. Si le fluide atomiseur utilisé est un gaz, la forme des particules obtenues est sphérique ; si c'est un liquide la forme sera irrégulière. La taille moyenne des particules de poudre dépend des variables d'atomisation comme la température, la pression du fluide atomiseur, le diamètre du jet métallique, l'angle formé entre les deux jets au point d'impact, la longueur du jet métallique la nature du produit atomisé...etc.

1.2.1 L'atomisation

C'est l'une des méthodes les plus récentes dans l'histoire de la MDP. Elle consiste à transformer le métal à l'état liquide par fusion à haute température puis le solidifier très rapidement par un jet d'eau ou de gaz inerte sortant d'une buse annulaire sous haute pression, sous atmosphère contrôlée dans une tour d'atomisation [1].

Cette méthode peut être appliquée aux métaux et alliages dont le point de fusion est en dessous de 1600 °C. Pratiquement tous les métaux peuvent être transformés en poudre par atomisation, à l'exception des métaux réfractaires dont la température de fusion est trop haute rendant ainsi cette technique inutile

économiquement à cause des dépenses énergétiques élevées pour atteindre ces températures. Cependant, à cause de sa grande productivité, et de la possibilité d'atteindre une bonne homogénéité chimique du métal à atomiser, ainsi que le contrôle facile des paramètres d'atomisation contrôlant les caractéristiques finales de la poudre, l'atomisation reste la méthode de production des poudres la plus répandue actuellement dans l'industrie toujours croissante de la MDP. L'atomiseur ainsi que les principaux paramètres d'atomisation sont présentés dans la figure 1 ci-dessous

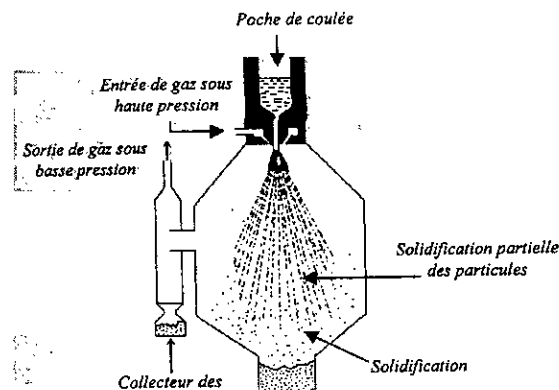


Figure 1.1 : Vue schématique d'un atomiseur [3]

1.2.2 Le procédé DPG

Dans ce procédé, le métal liquide est pulvérisé mécaniquement à la sortie d'un orifice étroit. Cette technique appelée aussi le *procédé allemand DPG* implique que le métal liquide subit une première fragmentation en traversant une nappe d'eau qui se présente sous la forme d'un double cône de révolution par choc sur des couteaux portés par un disque tournant à environ 3000 tr/min [2], le schéma du procédé est montré dans la figure 6 ci-dessous.

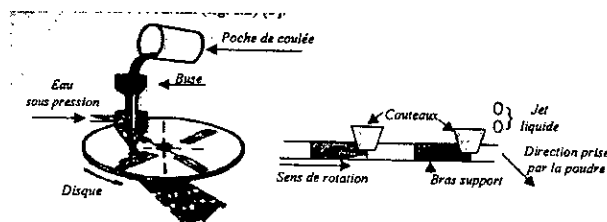


Figure 1.2 : schémas d'un pulvérisateur mécanique (procédé DPG)[3]

1.2.3 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 l'évacuation de l'hydrogène dissous. L'explosion du métal le désintègre 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.

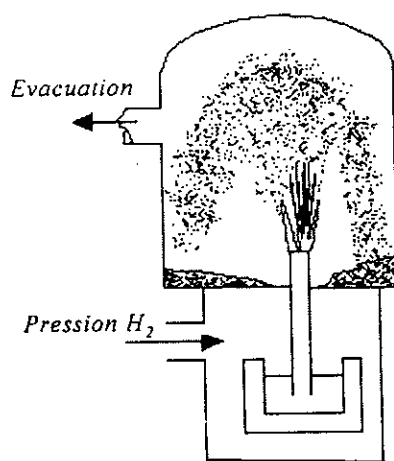


Figure1.3 : Pulvérisateur sous vide [3]

1.2.4 Le procédé de l'électrode tournante

Le procédé de l'électrode tournante est la méthode de production de poudre, qui consiste à fusionner par un arc électrique le bout frontal d'une barre métallique tournant à grande vitesse (environ 200 tr/min) [4] Ainsi, sous l'action des forces centrifuges inculquées à la barre, le métal liquide est désintégré puis projeté dans l'espace dans un plan vertical, circulaire et perpendiculaire à la barre. Ainsi, les gouttelettes liquides se solidifient dans l'atmosphère contrôlée de la chambre donnant une poudre à particules sphériques de surface lisse et libre de toute porosité. Cette méthode est utilisée pour la production des poudres hautement alliées. L'écart de taille entre les particules est très faible. Ce procédé a été conçu et développé par la

compagnie américaine *Whittaker Nuclear Metal Division* [4]. La technique est montrée schématiquement dans la figure ci-dessous

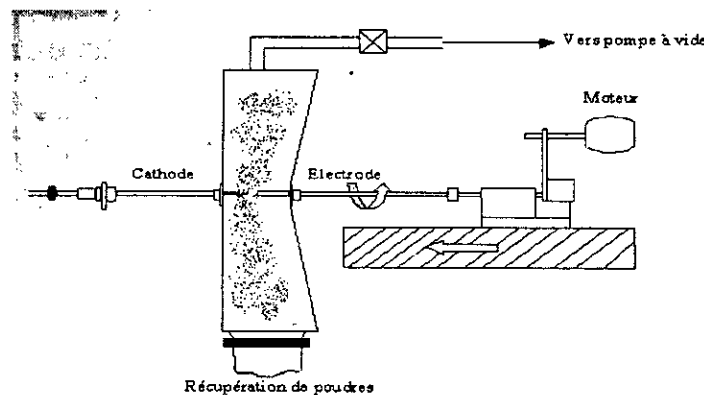


Figure 1.4: Pulvérisateur à électrode tournante [4]

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 minerais) en utilisant des agents réducteurs à une température inférieure à la température 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 présente des pores dans les particules. A cause de cette porosité, cette poudre est appelée: "sponge powder". [5]

Le procédé connu sous le terme de "Swedish Sponge Iron Process" a été développé par la compagnie suédoise *HOGANAS*. Cette méthode qui permet de produire une grande quantité de poudre de fer, consiste à réduire un minerai de fer très pur par du charbon à une température d'environ 1200 °C en présence de chaux. Après la réduction, on obtient l'éponge de fer qui après broyage, purification par séparation magnétique et recuit réducteur fournit une poudre de taille allant de 10 à 150 μm [2].

1.3.2 Le procédé de décomposition des métaux carbonyles

Ce procédé est utilisé pour la préparation des poudres de fer et de nickel très pures. Ces carbonyles liquides à bas point d'ébullition [43 °C pour $\text{Ni}(\text{CO})_4$ et 103 °C pour $\text{Fe}(\text{CO})_5$], se forment en faisant passer de l'oxyde de carbone sous une pression de 200 bars sur le métal. La décomposition du carbonyle à la pression atmosphérique entre 200 et 300 °C, fournit une poudre à particules sphéroïdales dont la taille varie entre 1 et 50 μm [2]

1.4 LE PROCEDE ELECTROLYTIQUE

L'électrolyse de solutions aqueuses des sels métalliques avec anodes 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.

- La déposition directe d'une poudre de faible adhérence donnant un dépôt spongieux qui est ensuite réduit en poudre fine par broyage mécanique suivi d'un criblage puis d'un recuit.
- La déposition d'un amas dense en couche fragile de métal qui peut être réduit en poudre par broyage mécanique suivi d'un criblage et d'un recuit.

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. [6]

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 LE PROCEDE MECANIQUE

Les procédés mécaniques regroupent toutes les techniques basées sur le broyage des métaux fragiles tels que le manganèse le chrome et certains alliages de cuivre. Si les matériaux à mouler sont ductiles, un traitement préalable de fragilisation à l'hydrogène peut être appliqué pour les rendre fragiles. Des systèmes tels que : Fe-Si, Fe-Cr, Fe-Al peuvent être transformés en poudre en utilisant plusieurs types de broyeurs, comme les broyeurs à boulets, à secousses, à marteaux, à cylindres, les tubes broyeurs, les broyeurs tourbillonnaires ainsi que divers désintégrateurs à choc.

Les broyeurs à mâchoires, à marteaux et à cylindres sont très utilisés pour le broyage grossier. Le broyage fin suit fréquemment le concassage préliminaire, car celui-ci donne rarement une poudre immédiatement utilisable [6]. Deux principaux procédés de broyage sont importants :

- Le procédé Marco Mesh

Ce procédé est utilisé pour le broyage des copeaux d'usinage d'acier ou de fonte malléable dans des broyeurs à marteau, ce qui permet d'obtenir des poudres d'acier assez grossières pouvant servir à la fabrication des pièces de grandes dimensions.

- Le procédé Cold Stream

Ce procédé est basé sur la projection d'un flux de particules grossières, à la vitesse du son, sur une cible fixe provoquant leur désintégration en fines particules. Ce procédé est utilisé surtout pour l'affinement de la taille des particules jusqu'à environ 2 à 10 μm [8]

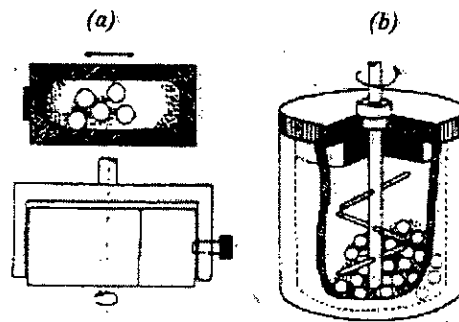


Figure 1.5 : Exemple de broyeurs [7]

- a) Broyeur vibrant $300 < V < 900$.
- b) Broyeur à attrition $100 < V < 300$.

CHAPITRE 2

LE BROYAGE MECANIQUE

2.1 INTRODUCTION

Le broyage 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 les oxyde. Le broyage des gâteaux spongieux obtenus par la réduction des oxydes ainsi que les agglomérés d'origines électrolytiques, est le processus le plus commun des processus de broyage. Dans ce but, des broyeurs divers sont employés pour transformer des particules grossières en particules fines.

La pulvérisation mécanique est limitée aux métaux relativement durs et fragiles, comme le tungstène et le bismuth, par exemple. 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 particule plus fines que celles des particules de poudres produites par atomisation a réactivé l'intérêt porté au broyage mécanique qui jouit d'une faible attention auparavant. Cependant, des recherches discrètes ont été menées par des entreprises industrielles dans ce domaine, ce qui a permis la mise en ouvre d'équipements sophistiqués de production des poudres par cette technique. Les objectifs du broyage incluent :

- La réduction de taille des particules
- Le changement de forme par la déformation et l'écaillage
- L'agglomération
- 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.

Dans la plupart des cas, l'objectif du broyage est la réduction de taille des particules. Cependant, les fractures durant les opérations de broyage à froid ou des soudures à froid de certaines particules impactées les unes aux autres peuvent aussi produire des transformations polymorphes [8]. L'effet spécifique que le broyage a sur une poudre dépend des propriétés physiques et chimiques de celle-ci et des conditions de broyage. Le choix du processus de broyage est basé sur le résultat désirable de l'opération de broyage, le comportement de la poudre dans les conditions de broyage choisies, les caractéristiques de la poudre et les propriétés physiques et mécaniques de l'équipement utilisé.

Pendant le broyage, plusieurs types de forces agissent sur la particule : l'impact, l'usure, et la compression. L'impact est la frappe instantanée d'un objet par

un autre. Les deux objets peuvent se déplacer sur une même trajectoire, mais en sens opposés ou alors que l'un est en mouvement et l'autre stationnaire. L'usure est la production des débris plus fins sous l'action du frottement entre deux corps

Ce type de force de broyage est efficace quand le matériau est friable et expose une abrasion minimale. Le cisaillement consiste en la réduction ou la division des particules et est d'habitude combiné avec d'autres types de forces. Le cisaillement contribue à la fracture en cassant les particules en de fines pièces individuelles avec un minimum de pertes énergétiques. La compression est l'application lente des forces compressives à un corps. Ce type d'action de broyage est d'habitude associé aux broyeurs à mâchoires et la cassure de grands agglomérés de matériaux durs et résistants.

La conception et l'amélioration des processus de broyage ont été basés principalement sur des données empiriques et semi-empiriques relatives aux matériaux à broyer et aux équipements de broyage. L'avancement a été fait dans la compréhension de la nature de la fracture fragile, des particules simples, de matériaux relativement homogènes comme le verre. La recherche fondamentale sur le broyage des métaux malléables est faible, bien qu'on connaît beaucoup de phénomènes sur le processus. Le morcellement n'est pas en juste proportion quand les particules sont impactées par des moyens les faisant entrer en collision.

La fracture se produit dans des matériaux durs et fragiles, avec une déformation plastique minimale des particules, avec une agglomération par soudage à froid, la déformation, le soudage à froid et la fracture se produisent à des degrés différents dans des matériaux durs et malléables. Bien que des poudres de tailles inférieures à 150 μm soient le plus fréquemment broyées, des particules de taille allant jusqu'à 6 mm et plus peuvent être traitées.

2.2 LES PRINCIPES DE BROYAGE

2.2.1 LA FRACTURE FRAGILE

La théorie énoncée par GRIFFITH [9], assume que tous matériau fragile contient des fissures bien dispersées, et que sa fracture émane de l'ensemble de ces fissures [9]. La contrainte σ_c à laquelle le craque se propage, dépend de la taille du crack. La forme générale de l'équation de la fracture pour les modes de chargement qui mènent à des fissures catastrophiques est :

$$\sigma_c = A \sqrt{\frac{\gamma E}{c(1-\mu^2)}} \quad (\text{Eq.1}) [9]$$

Où :

A : Constante numérique dépendant de la géométrie du crack, de sa position, du mode de chargement et des dimensions de la particule (exp : pour un crack en fente sur une feuille infinie $A=(2/\pi)^{1/2}$)

C : La taille du crack

E : Module d'élasticité.

μ : Coefficient de Poisson.

γ : Energie de surface de la substance utilisée.

Ainsi, la force mesurée dépend de la taille du crack, les propriétés élastiques et de l'énergie de surface. Pour les matériaux fragiles, γ est prise entre 10^3 et 10^4 erg/cm².

La contrainte σ pour la fracture d'une particule peut être représentée par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{2Er}{L}} \quad (\text{Eq.2.2}) \quad [9]$$

Où

L : Longueur du crack

r : Rayon du crack à la pointe de la propagation

Lorsque la contrainte à la pointe du crack égalise la force de cohésion entre atomes, toutes les nouvelles énergies de surface sont approvisionnées par la contrainte elle-même à partir de l'énergie de déformation élastique et correspond approximativement au modèle de GRIFFITH.

Trois types d'écoulement (faciaux, en volume ou en coin) ont été découvert par GILVARRY [9], avec le respect de la position dans la surface ou à l'intérieur des particules individuelles. La fracture initiale en surface des particules individuelles, généralement commence par un écoulement en surface sur la particule originale. Cependant, l'insuffisance de l'écoulement en surface existe pour expliquer le grand nombre de fragments formés durant la fracture fragile. Lorsqu'un écoulement intérieur est activé, deux surfaces en opposition sont créées, chacune d'elles contient des écoulements coupés par la propagation de la fracture. De nouvelles surfaces de fractures sont ainsi produites par la propagation des fractures à partir de ces écoulements volumiques.

D'après GILVARRY [10], les trois types d'écoulement sont distribués indépendamment l'un de l'autre, comme conséquence de l'orientation hasardeuse des fractures en surfaces et la contrainte de fracture. Les écoulements activés sont distribués aléatoirement, indépendamment d'une quelconque contrainte produisant des fractures. Plus spécifiquement, la position de l'écoulement à l'intérieur d'un domaine est indépendante de la position des autres écoulements. Les fractures sont

initiées par un système de contraintes extérieures qui sont dégagées avec la propagation des premiers écoulements faciaux.

Après la fracture initiale, les écoulements sont activés par les ondes de contraintes qui sont générées par l'application et le retraitement des contraintes externes. Selon GILVARRY l'exposition des écoulements est distribuée selon une forme parabolique.

Durant une opération de broyage, les conditions de réalisation d'une fracture sont satisfaites occasionnellement. Le temps et l'énergie requis pour produire une fracture varient avec le processus de broyage et son environnement. Comme la taille des particules diminue, la concentration de l'écoulement et la taille diminue à un point où l'écoulement en arrêtes ne reste plus longtemps dans les particules activées par les contraintes [10]. En ce point, la fracture s'arrête.

2.2.2 LE BROYAGE ULTRAFIN DES MATERIAUX DURS ET FRAGILES

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

Eventuellement, les processus de broyage atteignent des limites efficaces où les effets chimiques et physiques associés aux surfaces, arrêtes et aux coins se multiplient jusqu'à inhiber la pulvérisation. La longueur de l'arrête par unité de volume varie avec le carré de l'aire de la surface spécifique. Ainsi la probabilité pour qu'une particule soit sous contrainte jusqu'à la cassure devient de plus en plus faible.

Si la particule est déformée plastiquement, la fracture sera difficile à réaliser et la probabilité pour qu'une contrainte agisse est réduite d'avantage. Comme la taille des fragments diminue, la tendance des particules à s'agglomérer augmente. Pendant que l'opération de broyage continue, les particules deviennent de plus en plus fines et s'approchent de la limite de finesse, et une énergie maximale est dépensée. Les facteurs majeurs qui contribuent à un broyage limite sont [11] :

- L'augmentation de la résistance à la fracture
- L'augmentation de la cohésion entre les particules, et la diminution de la taille des particules qui causent l'agglomération;
- L'augmentation excessive entre les surfaces d'impact qui se trouvent minimisées lorsque le diamètre des boulets ou le rayon de courbure décroît;
- Le revêtement du milieu broyant par de fines particules qui protègent le micro lit de l'impact;
- la rugosité de surface du milieu broyant;
- l'augmentation de la viscosité apparente lorsque la taille des particules diminue.

- Diminution de la friction interne du film lorsque la taille des particules diminue, et de même la diminution de la production des fines particules par le mécanisme de l'usure, et de la probabilité de la récupération des particules.

Généralement, quant la pulvérisation agit pendant un temps excessivement long, la contrainte nécessaire pour la fracture des particules augmente. Pendant que les contraintes locales requises pour la fracture diminuent. [11]

2.2.3 LE BROYAGE DES PARTICULES INDIVIDUELLES

Les poudres sont classées selon la taille des particules, leur distribution de tailles leur forme ainsi que leur état de surface. Ses caractéristiques déterminent la coulabilité, la densité apparente, la frittabilité, la compressibilité, et les propriétés des produits frittés. Les figures 2.1 montrent certaines de ces propriétés.

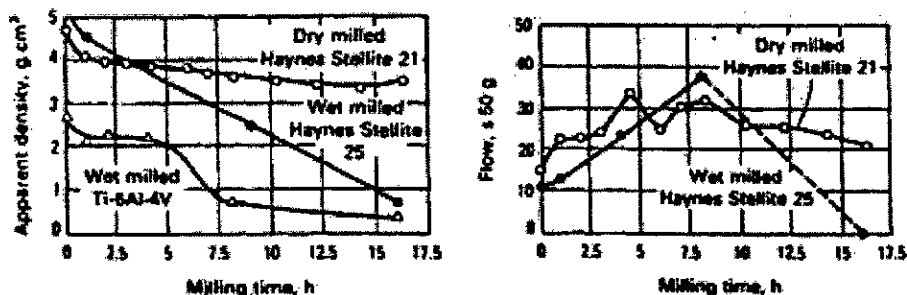


Figure 2.1: Effets du temps de broyage à vibration sur la densité apparente et le champ de coulabilité des poudres à base de Cobalt et de Titane [12]

Les caractéristiques des particules déterminent les façons et les conditions dans lesquelles les particules sont déformées ou fracturées, et leur résistance à la cassure. Ainsi, la fracture mécanique des particules individuelles doit être prise en considération lors du choix des conditions et des équipements de broyage.

La figure (2.2) montre l'écrasement des particules individuelles entre les boulets. Cette situation est rencontrée lors des opérations de broyage des grosses particules ou lors du broyage d'une fraction de poudre, comme avec les gros granulés des matériaux céramiques, des métaux durs, ou les grosses particules des poudres des métaux ductiles atomisées. Dans ces conditions, beaucoup d'impacts de particules individuelles peuvent avoir lieu. Avec les céramiques et les métaux durs, de grosses particules fragiles sont rapidement réduites en une poudre fine et ultrafine. Comme il est montré dans la figure (2.2.a).

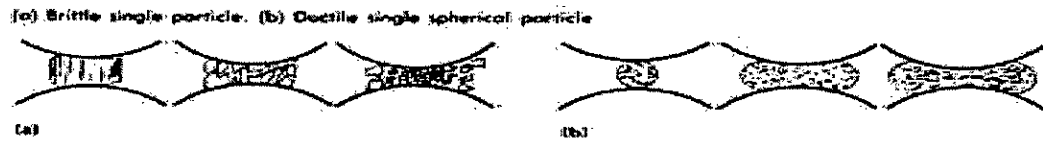


Figure 2.2: Effets de l'impact sur les matériaux fragiles et ductiles [12]

Pendant le broyage des métaux ductiles figure 2.2.b, les particules individuelles ne se fracturent pas, mais se déforment, et subissent de cette façon un changement de forme qui s'accompagne rarement d'un changement négligeable en masse.

Les grosses particules individuelles des matériaux fragiles se désintègrent en fragments, tandis que, celles des matériaux ductiles se déforment dans un premier temps en galettes pour ensuite prendre la forme de flocon comme le montre la figure suivante.

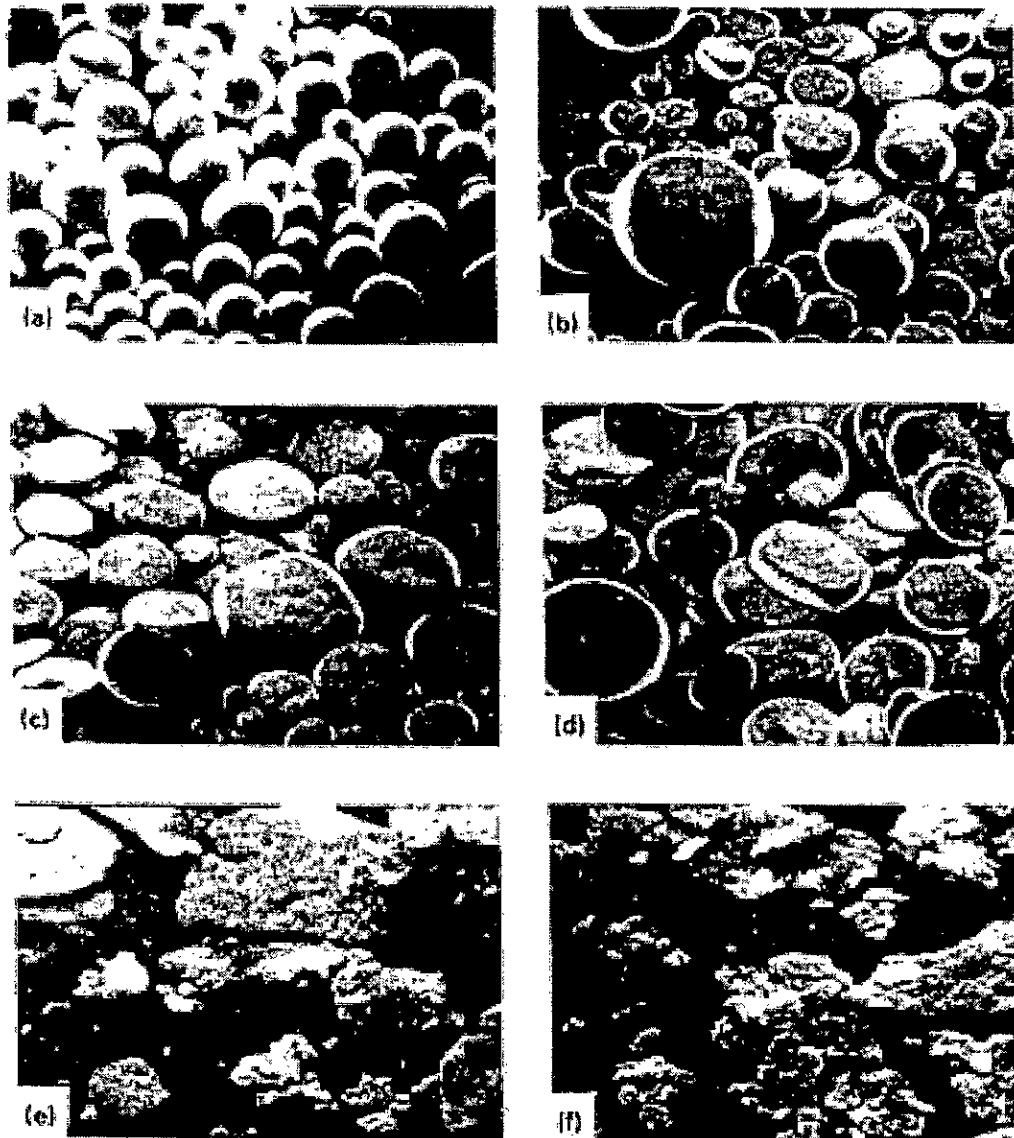


Figure 2.3 effets du temps de broyage sur le changement de forme des particules sphériques d'un alliage de Ti-6AL-4V [12]

2.3 LES PARAMETRES DE BROYAGE ET LES CARACTERISTIQUES DES POUDRES

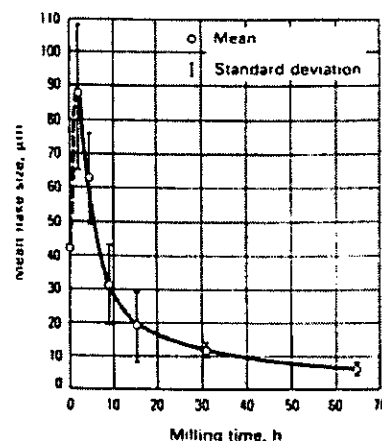
Les éléments de broyage dans un broyeur à boulets se déplacent à différentes vitesses, par conséquent, la force de collision, la direction et l'énergie cinétique entre deux ou plusieurs éléments varient considérablement à l'intérieur de la charge de boulets. L'usure par friction ou les forces de frottement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

Les forces de friction exercent une action d'usure entre les particules et réduisent la taille des particules par l'attrition, en produisant des débris d'usure. Les forces d'impact réduisent effectivement la taille des particules durant le broyage des fractions de grosses particules ou des matériaux durs et/ou fragiles. Les forces d'impact sont préférables dans les processus de déformation des poudres métalliques. Comme par exemple la production des poudres sous forme de flocon.

La figure 2.4 montre le changement de la largeur du flocon d'une poudre de fer en fonction du temps de broyage dans un broyeur à boulets à vibrations. L'attrition est la force la plus effective dans le broyage fin des matériaux à la fois durs et ductiles et dans les alliages mécaniques. Dans la plus part des broyeurs à boulets, les particules sont à la fois exposées aux forces d'impacts et aux forces d'attritions.

Lorsque les forces sont hautement énergétiques on peut avoir des soudures entre les particules ou encore entre les particules et les parois de la chambre de broyage.

Figure 2.4 :
La relation entre la taille des flocons et le temps de broyage pour un fer électrolytique broyé dans un broyeur à vibration de boulets Megapact [12]



Les forces d'impact sont directement proportionnelles à la masse du milieu broyant. Par conséquent, la vitesse du processus et les forces qui agissent sur les particules sont une fonction directe du diamètre effectif et de la masse des corps broyant. Les valeurs réelles des forces de collision diffèrent largement des valeurs théoriques à cause de la complexité du mouvement du milieu, la variation de la

vitesse, de la longueur des trajectoires, et les trajectoires des corps broyant. La viscosité du fluide influe aussi sur le taux de collision dans le cas d'un broyage humide.

Généralement, le choix ou la sélection de la taille et la densité du milieu broyant est déterminé par la déformation et la résistance à la fracture des métaux. Pour les matériaux durs et fragiles la résistance à la fracture est le seul critère de sélection. De larges et denses milieux broyant sont utilisés pour broyer de grosses et solides particules. Alors que les milieux de petits diamètres sont utilisés pour des broyages fins. Par exemple des grains en céramique ayant un diamètre de 1.6 mm et une densité de 3.9g/cm³ peuvent être utilisés pour réduire de gros et minces flocons métalliques à des flocons très fins. Les éléments de broyage de petite taille ne peuvent pas être utilisés dans un broyage conventionnel à boulets Tumbler. Pour le broyage fin des matériaux durs les milieux en carbures de tungstène sont recommandés.

Souvent, on doit faire un compromis entre la taille des boulets et le matériau. Bien que l'utilisation des boulets en carbures de tungstène soit économique pour des broyages expérimentaux à petite échelle ou pour le broyage des métaux chers, les coûts peuvent être prohibitifs pour certaines opérations de broyage à grande échelle. Certains milieux comme les boulets en acier inoxydable, peuvent ne pas être disponibles en grande quantité pour certaines tailles, ainsi les conditions optimales du broyage ne peuvent pas être satisfaites.

L'aire de la surface et la taille des particules des matériaux non métalliques changent continuellement. L'aire totale de la surface de milieu augmente quand la taille des particules diminue. Cependant, pour les métaux deux facteurs additionnels doivent être pris en considération en addition à la pulvérisation. Les particules métalliques peuvent s'agglomérer par soudure à froid durant l'impact, ainsi il y aura une réduction de l'aire de la surface, et un changement de forme à cause de la ductilité et l'aptitude 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 en taille durant l'agglomération par soudage.
- Ou changer de forme par micro forgeage.

Pour les métaux, le changement dans l'aire de la surface ou de la taille des particules ne constitue pas un critère significatif pour comparer les effets du changement dans les paramètres du processus, la dominance des processus, et les équipements du broyage.

Le critère le 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 large pour contenir l'empreinte de la plus petite pyramide en diamant, donne des mesures convenables de l'effet du broyage sur les poudres métalliques. Car la micro dureté est une mesure de travail à froid et des défauts internes produits par le broyage. Comme c'est montré dans la figure 2.5.

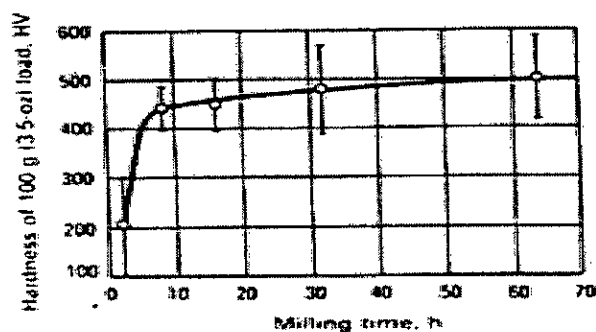


Figure 2.5 : Effet du temps de broyage sur la micro-dureté du Nickel 123 [12]

L'espacement des raies de la diffraction aux rayons-x est sensible à la quantité du travail à froid et à l'affinement de la structure cristalline qui résulte d'un travail à froid poursuivi au delà d'un niveau de saturation. Les changements dans le taux de déformation d'une poudre métallique broyée par des paramètres fixes sont illustrés par l'élargissement des raies de diffraction en fonction du temps de broyage, comme le montre la figure 2.6.

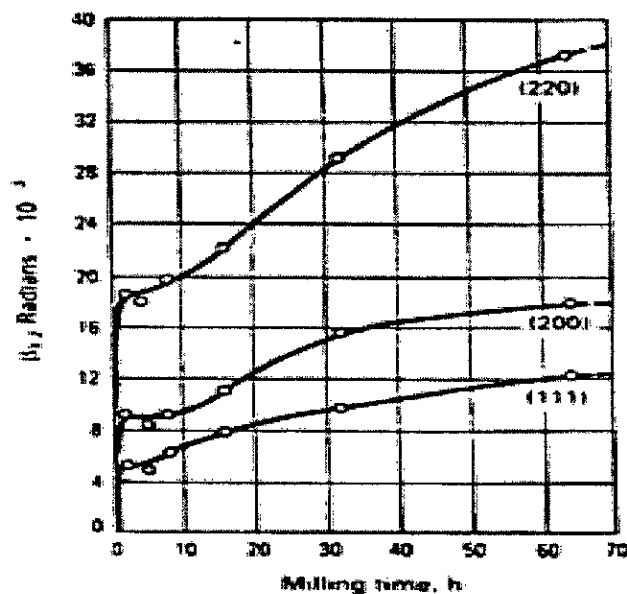


Figure 2.6 : Relation entre l'espacement des raies de diffraction et le temps de broyage à vibration pour une poudre de Nickel 123 [12]

2.3.1 La relation de l'énergie

Lorsque un métal est déformé plastiquement par un travail à froid, la majeure partie de l'énergie mécanique de déformation est convertie en chaleur. Cependant, seulement une petite quantité (environ 5%) est emmagasinée dans le matériau ce qui va contribuer à l'augmentation de son énergie interne. L'énergie associée à la tension du réseau ou au travail à froid est minimale pour les panicules dures et fragiles mais, elle peut être grande pour les matériaux ductiles. L'énergie dépensée pour surmonter la friction entre les particules est transformée en chaleur et accomplit un travail inutile dans le broyage.

Si la température de la poudre augmente au dessus d'un certain point, les particules métalliques ayant subies un travail à froid peuvent subir une recristallisation. La chaleur est générée par la déformation des particules, et par la déformation élastiques des boulets de broyage et les parois de la chambre de broyage.

La figure 2.7 illustre les courbes de température typique contre le temps de broyage pour un broyage à sec d'une poudre d'un alliage de (Fe-27Ni-16Cr) dans un broyeur à vibration [13].

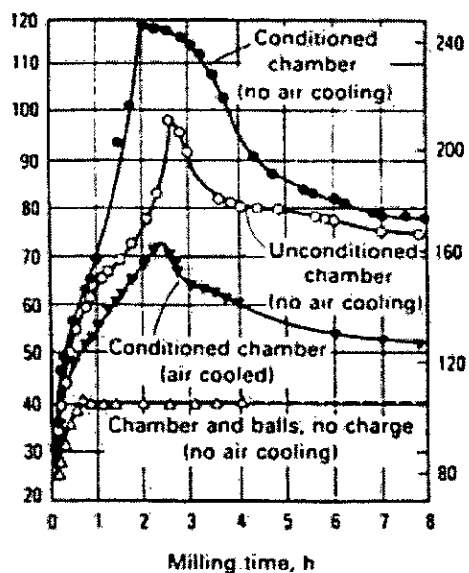


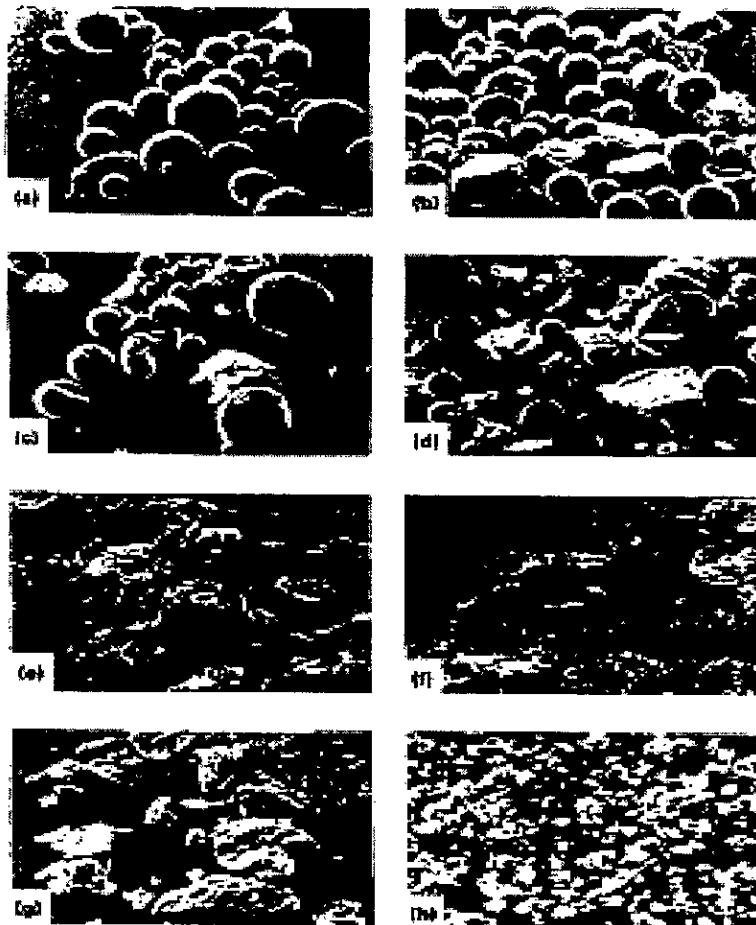
Figure 2.7 : Courbes de chauffage pour une chambre de broyage de 280 cm³ en acier inoxydable durant un broyage à vibration du Fe-27Ni-16Cr [12]

Généralement, la température augmente durant un travail à froid sévère, et chute brusquement avant que le travail à froid n'atteigne son niveau de saturation, puis elle décroît lentement pendant le prolongement du temps de broyage.

2.3.2 Les processus de broyage

Les changements morphologiques que subissent les particules pendant le broyage des poudres métalliques, (voire figure 2.8) sont produits par les processus suivants :

Processus	Symboles de désignation
Micro forgeage	M
Fracture	F
Agglomération	A
Soudure	A _w
Imbrication mécanique	A _m
Auto adhésion	A _a
Désagglomération	D



(a) poudre initiale. (b) après 4h. (c) après 8h. (d) après 16h. (e) après 32h. (f) après 64h.

Figure 2.8 : Micrographie électronique d'une poudre d'alliage à base de Cobalt [12]

(La poudre est broyée dans, un milieu aide broyage, composé de l'alcool éthylique avec du Nitrate d'Aluminium)

2.3.2.1 Micro forgeage

Le processus initial prédominant durant le broyage est la compression des formes de particules des métaux ductiles au moyen de l'impact du milieu broyant, comme le montre la figure (2.2.b). Des particules individuelles ou un amas de particules sont percutés à maintes reprises par le milieu broyant. Ce qui provoque un changement dans leurs formes (les particules s'aplatissent), accompagné d'un changement petit ou nul en masse.

2.3.2.2 Fracture

Après un certain temps de broyage, les particules vont se déformer à tel point que les cracks s'initient et se propagent pour finalement fracturer ces particules. La présence des fissures, des cracks, des défauts et des inclusions à l'intérieur des particules facilite la fracture.

Les particules spongieuses ou de formes irrégulières contiennent des fissurations et des cracks qui facilitent la compression, la rupture par la fatigue et la fragmentation, comparées aux particules sphériques lisses et relativement non poreuses produites par atomisation. Les métaux friables comme par exemple (Antimoine, Bismuth, Manganèse, Chrome. . .), et les alliages intermétalliques fragiles comme (Cu-Al, Al-Mg, Cu-Sn, Ni-Fe, Ni-Zn et P-Cu), peuvent facilement être broyés en poudre.

2.3.2.3 L'agglomération

L'agglomération des particules peut se produire par soudure, imbrication des surfaces rugueuses et spongieuses, ou par l'auto cohésion. L'auto cohésion est l'interaction moléculaire des particules entre elles, et est caractérisée par les forces de *VAN DER WALLS*. La désagglomération est par contre le processus inverse qui casse l'aggloméré formé par auto cohésion, mais sans désintégrer les particules de poudre.

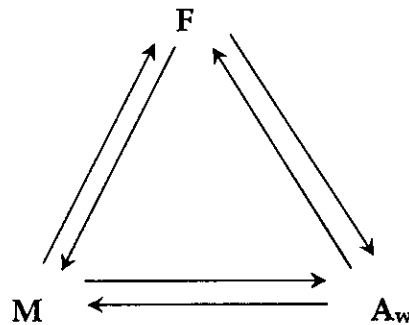
2.3.3 Mécanisme de broyage

Un des types des mécanismes de broyage, consiste en un stade initial de micro forgeage dans lequel les particules sont déformées en l'absence de la fracture et de l'agglomération par soudure. Eventuellement, les particules deviennent tellement déformées et fragilisées par le travail à froid, qu'elles entrent dans un second stade où elles sont fracturées par le mécanisme de rupture par fatigue et/ou par la fragmentation des flocons fragiles. Les fragments générés par ce mécanisme peuvent continuer à diminuer en taille en l'absence des grandes forces d'agglomération, par l'alternance du micro forgeage et de la fracture. Quand la fracture domine et le rôle du micro forgeage est négligeable en l'absence de l'agglomération par soudure, les flocons continuent à devenir petits jusqu'à ce que l'interaction moléculaire agisse.

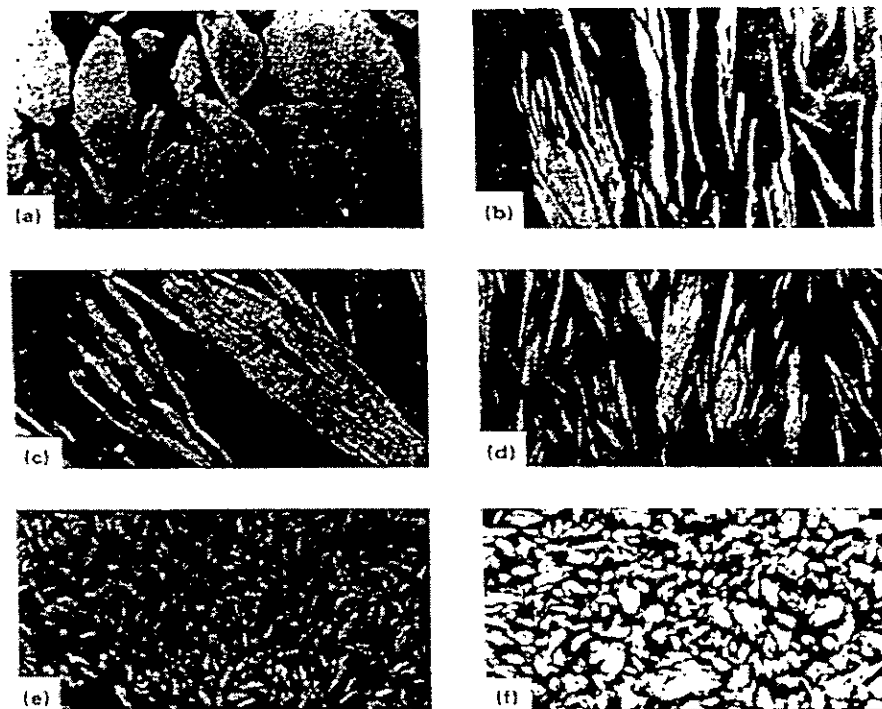
Au fur et à mesure que les particules deviennent plus fines (en particulier les flocons), le couplage des forces tend à être plus important, et les agglomérés deviennent plus grands. Eventuellement, les forces de broyage qui désagglomèrent les particules s'équilibrent avec les forces couplées présentes, ce qui donne un aggloméré de taille de particules équilibrée.

Quand la soudure à froid agit entre les particules, le processus initial sera le

micro forgeage, ceci est suivi d'un second stade qui implique les processus de fracture (F), de micro forgeage (M) et de la soudure à froid en boucle fermée, comme le montre le schéma ci-dessous :



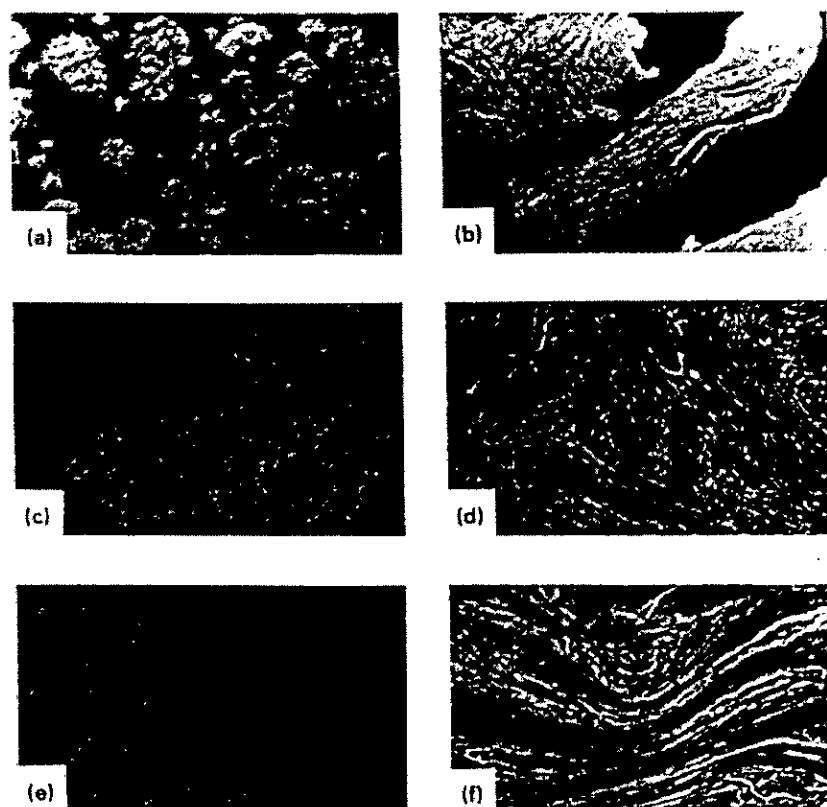
La fracture et la soudure produisent des particules composites qui consistent en des particules originales fragmentées et en des particules composites. A des stades avancés du processus de broyage, les particules composites sont entièrement composées de particules composites fragmentées. Le degré d'affinement et du mélange de la structure composite est une fonction du temps de broyage, comme l'illustrent les figures 2.9 et 2.10 respectivement pour le broyage humide d'une poudre de Fer, et pour le broyage sec d'une poudre de Nickel.



(a) poudre initiale. (b) après 4h. (c) après 8h. (d) après 16h. (e) après 32h. (f) après 64h.

Figure 2.9 : Fer électrolytique montrant des sections transversales de particules [12]

(La poudre est broyée dans de l'heptane)



(a) poudre initiale. (b) après 4h. (c) après 8h. (d) après 16h. (e) après 32h. (f) après 64h.

Figure 2.10 : Le nickel 123 montrant des sections transversales de particules [12]

Après un certain temps de broyage, la soudure à froid et la fracture atteignent un état d'équilibre stable. La taille moyenne des particules obtenues dans ce stade, dépend de la facilité par laquelle les agglomérés peuvent être formés par la soudure, de la fatigue et de la force de rupture des particules composites, et de la résistance des particules à la déformation. La distribution de taille des particules est étroite parce que les particules de taille plus grosse que la moyenne sont réduites au même rythme que les fragments de taille inférieure à la moyenne s'agrandissent dans un tas de petites particules et de débris produits par attrition.

Ce processus est montré dans les figures 2.5 et 2.11. Lorsqu'un grand nombre de fines particules est produit par attrition, le degré d'affinement est très élevé. Si les particules sont spongieuses, ou rugueuses, le micro forgeage peut être accompagné par une agglomération.

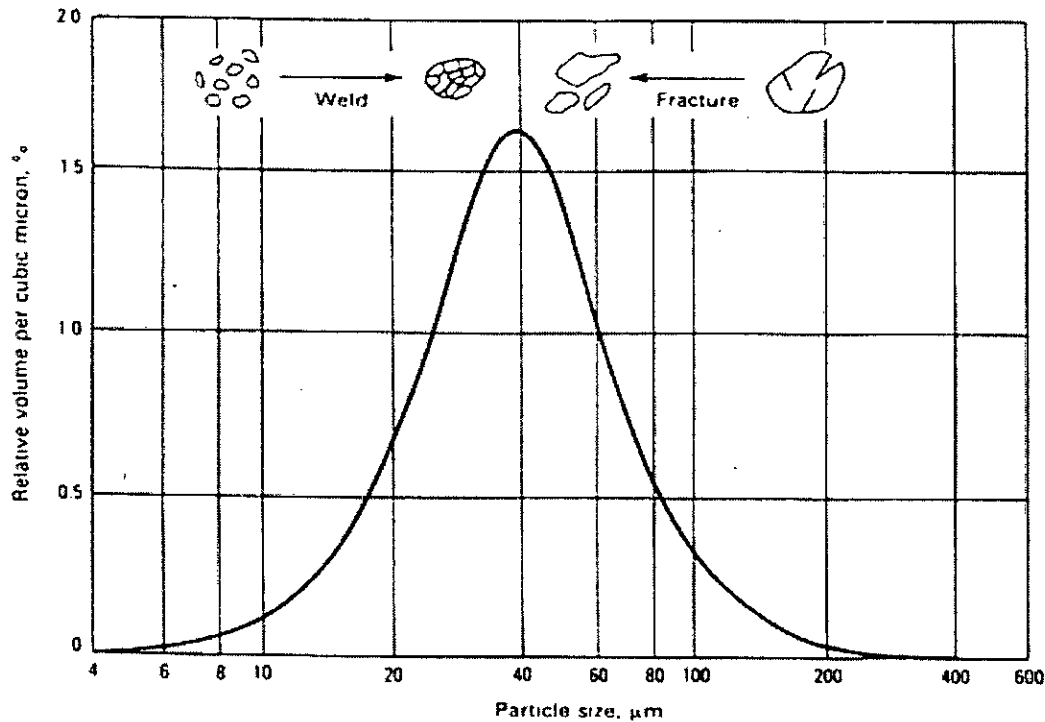


Figure 2.11 : Courbe de distribution de tailles étroite, à cause de la tendance des petites particules à se souder et des grosses particules à se fracturer [12]

2.4 LES EQUIPEMENTS DU BROYAGE

Durant la pulvérisation, la machine de broyage met sous contrainte un nombre maximum de particules individuelles d'une masse de poudre pour initier la fracture avec un maximum d'énergie. Le mouvement du milieu de broyage et de la charge varie selon le type du broyage. Cela en considération du mouvement et des trajectoires des boulets individuels, du mouvement de la masse des boulets et du degré de l'énergie requise pour les forces d'impact, de cisaillement, et de la compression qui agissent sur les particules de poudre.

2.4.1 Broyeur à boulets Tumbler

Dans le broyeur Tumbler, comme le montre la figure 2.11, le mouvement des boulets ou des tiges dépend de la vitesse de rotation des parois de la chambre. Les boulets peuvent rouler dans des couches parallèles sur la surface de la charge, ou ils peuvent être projetés dans l'espace et tombent sur les particules.

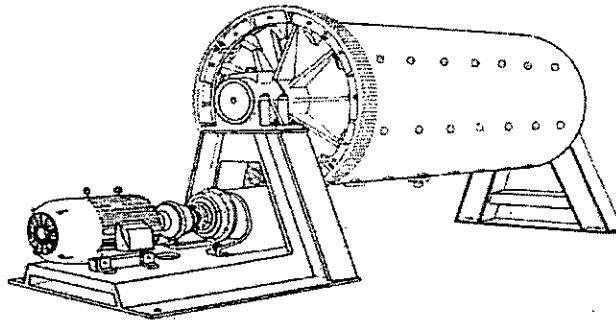


Figure2.11 : le broyeur Tumbler [14]

2.4.1.a Les paramètres d'un broyeur à boulets

Le taux de broyage d'une poudre est fonction de la quantité de poudre dans le volume totale entre boulets. Il atteint sa valeur maximale quand le remplissage de la poudre est à 100%. La vitesse de broyage doit être ajustable pour assurer l'opération avec les proportions requises de boulets pour les cas de broyage par cascade ou cataracte. Cette proportion est largement dépendante de la vitesse de rotation et du coefficient de friction du matériau constituant la charge. 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 [14].

Si le glissement de la charge contre les parois de la chambre de broyage est considéré négligeable, la vitesse de rotation critique de broyage peut être calculée par

$$N_c = 76.6 \sqrt{\frac{1}{D}} \quad (\text{Eq.2.3})$$

Où :

D : Le diamètre du broyeur;

N_c : La vitesse critique de broyage, en tour par minute.

Ces paramètres sont approximatifs et peuvent ne pas être valides pour les particules des métaux qui tendent à s'agglomérer par soudure.

Le mélange à l'état solide peut être mené dans le broyeur à boulets Tumbler, utilisant un diamètre de boulets variant de 16 à 25 mm, dans le cas où le diamètre du broyeur varie de 1.5 à 1.8 m et dans le cas où les autres conditions encourageant l'agglomération par soudure à froid sont satisfaites. Pour les grands plateaux de production de superalliages alliés mécaniquement, le broyeur Tumbler remplace le broyeur à attrition. Les temps de broyage pour le broyeur Tumbler sont plus longs pour atteindre le même niveau de mélange mené dans les broyeurs à attrition ou à vibration. Mais, la productivité est en générale substantiellement plus grande. Généralement, les broyeurs Tumbler sont utilisés pour pulvériser ou écailler (mettre sous forme de flocons) les métaux en utilisant un aide broyage, pour prévenir l'agglomération par soudure à froid et pour minimiser l'oxydation. [15], [16].

2.4.2 Les broyeurs à attrition

Le broyage dans un broyeur à attrition (voire figure 2.12) est influencé par l'action d'un agitateur qui a un axe de rotation verticale avec des bras horizontaux. La rotation de l'agitateur cause un mouvement différentiel entre les boulets et le matériau en cours de broyage. Par ce fait, le degré de contact en surface est plus haut que celui atteint dans le broyeur Tumbler ou à vibration. Le broyage se fait par effets des forces d'impacte et de cisaillement. Le produit broyé est percuté par les boulets de déplaçant suivant différentes trajectoires, et qui se heurtent à l'intérieur de la charge dilatée du milieu et de la poudre.

Tandis que les broyeurs à boulets utilisent de gros boulets (diamètre 12.7 mm ou plus) et tournent à des vitesses de rotation basses de l'ordre de 10 à 50 trs/min, le broyeur à attrition utilise des vitesses de l'ordre de 60 trs/min pour les unités de production et 300 trs/min pour les unités de laboratoire. La puissance d'entrée dans le broyeur à attrition est utilisée pour agiter le milieu, et non pour faire tourner ou vibrer le lourd contenu du récipient.

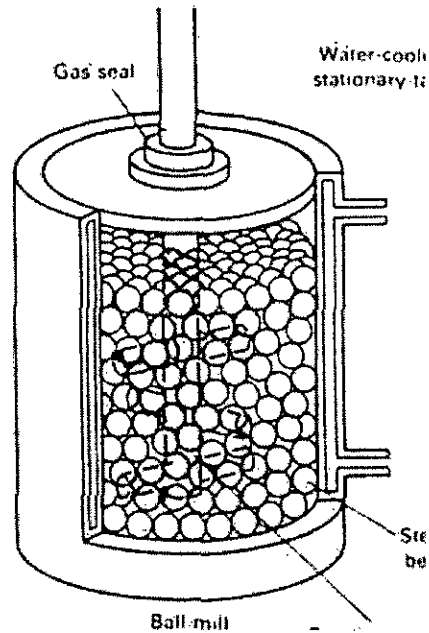


Figure 2.12 : Broyeur à boulets à attrition [12]

Pour les matériaux durs tels que les céramiques, les carbures et les métaux durs, les broyeurs à attrition sont plus efficaces que les broyeurs conventionnels à vibration ou Tumbler. Les avantages essentiels du broyeur à attrition pour le mélange et le mixage des poudres des outils de coupe en tungstène carbure ou cobalt incluent un court temps de broyage, et une production de particule de taille fine (de l'ordre du micron).

Les broyeurs à attrition broient effectivement les métaux dans une atmosphère inerte, comme pour les processus d'alliage à l'état solide ou mécanique, comparés aux gros broyeurs à boulets Tumbler ou à vibration. Par conséquent, les broyeurs à boulets Tumbler sont normalement utilisés pour une production de 135 à 180 Kg/jour.

2.4.2.a Le mécanisme du broyeur à attrition

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

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

Pour le broyage fin, les forces d'impact et de cisaillement doivent être présentes simultanément. Dans le broyeur à attrition, l'impact est causé par le contact constant du milieu de broyage, dû au mouvement irrégulier. L'action de cisaillement

est produite par le mouvement aléatoire des boulets dans les différentes directions de rotation. La plus grande agitation du milieu agit au point qui se trouve aux deux tiers du chemin à partir du centre. Le broyage n'agit pas sur les parois de la chambre, qui sert non comme surface de broyage mais comme récipient.

Dans le broyeur à attrition, le temps de broyage est relié au diamètre du boulet et à la vitesse de l'agitateur dans les conditions données, par :

$$t = k d / (n)^{1/2} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

où

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

k : une constante qui varie avec le type du milieu et du broyeur utilisé.

d : diamètre de la chambre.

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

Les broyeurs à attrition sont classés en deux types :

- broyeur à attrition à fournée continue.
- broyeur à attrition à circulation.

Dans les broyeurs à attrition à fournée, le matériau est introduit dans la chambre et broyé juste à une taille de particule voulue. Les parois de la chambre sont revêtues de telle façon que l'eau chaude ou froide circule pour contrôler et maintenir la température de la fournée. Les broyeurs à attrition à fournée peuvent aussi broyer les matériaux de haute densité comme les carbures de tungstène, et aussi broyer les matériaux visqueux, et ils sont recommandés pour le broyage à sec et pour la désintégration des matériaux endurcis.

Le système de broyage à circulation comprend un broyeur à attrition avec un grand réservoir, généralement dix fois plus grand que le volume de l'unité de broyage. Les broyeurs à attrition ont généralement des taux élevés de pompage. Normalement, le contenu du réservoir passe à travers le système à raison de dix fois par heure.

Les avantages des broyeurs à attrition à circulation sont les grandes quantités de matières pouvant être manipulées avec un investissement minimum dans le milieu du broyage et de l'équipement.

2.4.3 Le processus d'impact Coldstream

Le processus Coldstream est un processus à vitesse élevée, durant lequel le matériau est entraîné par un courant de gaz pour ensuite s'écraser sur une cible stationnaire. Après que le matériau heurte la cible, il se fracasse, et il est enlevé de la chambre d'impact par aspiration. Le matériau est ensuite transporté vers un classificateur, qui permet aux particules de grosses tailles de tomber dans un récipient de stockage pour un impact ultérieur contre la cible. Le produit final est séparé par le classificateur, puis transporté dans les conteneurs de collection.

La chambre dans ce procédé est revêtue avec des carbures de tungstène ou un autre matériau résistant à l'usure. La lance super sonique et la cible sont fabriquées à partir des carbures de tungstène cémentés. Mais, d'autres matériaux résistants à l'usure peuvent être utilisés pour fabriquer ces composants. La figure 2.13 montre un jet de matériau brut percutant à grande vitesse une cible, en se fracassant.

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

Le coût élevé du traitement additionnel est justifié par la production d'une poudre plus fine que celle disponible commercialement par atomisation. La plus part des poudres atomisées ont un film mince d'oxyde en surface des particules. Durant le procédé Coldstream, le film fragile d'oxyde est rayé du métal puis fracassé en fines poussières. Le procédé Coldstream produit en général une poudre d'oxyde, qui est ultérieurement séparée de la poudre de métal produite.

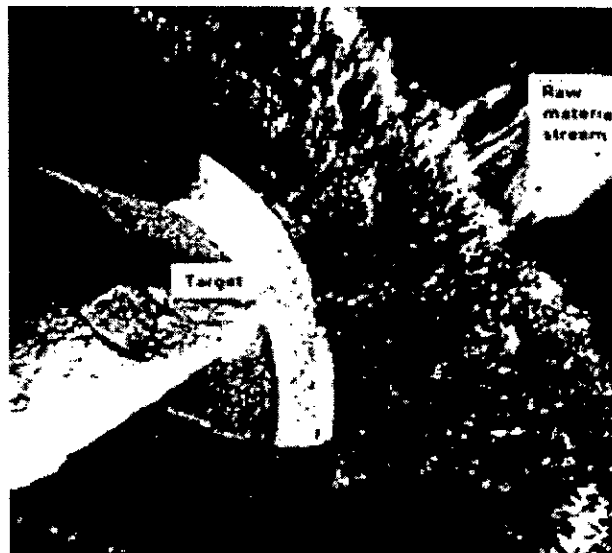


Figure 2.13 : Processus d'impact durant le procédé Coldstream

2.4.4 Le broyeur à haute énergie

Les broyeurs à vibration, à attrition, et les broyeurs Tumbler de grand diamètre peuvent être classés comme des broyeurs à haute énergie. Ils peuvent être effectivement utilisés dans les processus d'alliage à l'état solide ou mécanique. Les applications qui conviennent au broyage à haute énergie incluent :

- la production de poudres métalliques sous forme de flocons [17,18]
- L'alliage mécanique. [8, 11, 14, 15, 19, 20]
- Les poudres composites. [18]
- Le contrôle de la forme des particules.
- Le contrôle de la coulabilité des poudres.
- Le contrôle de la densité apparente des poudres.
- Le carbure de tungstène et ses alliages.
- Le mélange par métallurgie des poudres. [18]
- L'alliage des éléments non miscibles à l'alliage [11]
- Le contrôle de la taille des particules.
- Les poudres ultra-fines [9, 10]
- Le frittage activé [19]

2.4.5 Les broyeurs à marteau et à cylindre

Les broyeurs à marteau et à cylindre sont utilisés dans l'industrie de la métallurgie des poudres pour broyer de grandes quantités de gâteaux frittés, qui sont un produit intermédiaire dans la production des poudres métalliques par la réduction des oxydes. Si de telles poudres sont destinées à être utilisées dans les processus conventionnels de la métallurgie des poudres, il est nécessaire qu'elles possèdent de bonnes caractéristiques de résistance à vert et de compressibilité. Pour ces raisons, les gâteaux frittés doivent être réduits en une poudre dont la taille est assez fine. La figure 2.15 montre des particules de poudres de cuivre en forme de blocs, produites par un broyeur à marteau d'un gâteau spongieux fritté.

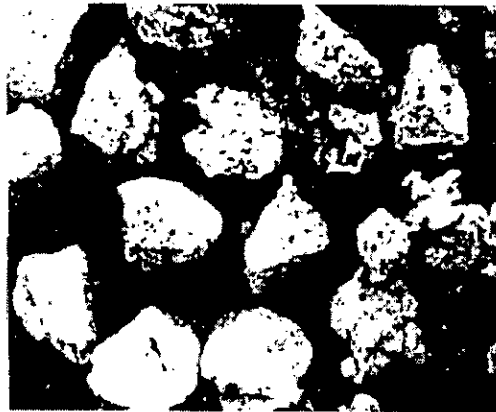


Figure 2.15 : Particules de poudre de cuivre obtenues dans un broyeur à marteau [12]

2.4.6 Les broyeurs à vibration de boulets

2.4.6.1 Le broyeur à tube vibratoire

Dans le cas du broyeur à tube vibratoire montré dans la figure 2.16 le mouvement oscillatoire des boulets est compliqué. La trajectoire des boulets dépend de plusieurs facteurs incluant, la vitesse de vibration, l'amplitude, la courbure des cotés des parois de la chambre de broyage, le mouvement horizontal du broyeur, et le contact de la charge avec le haut de la surface de la chambre de broyage. Les boulets tournent le long des parois de la chambre et parfois se déplacent horizontalement suivant des spires. Le mouvement giratoire des boulets dans des chambres cylindriques provoque parfois des déformations et/ou des rainures dans les parois de la chambre. Les boulets tournent aussi à différentes vitesses et dans différentes directions, causant ainsi une action de cisaillement qui est désirable dans les opérations de mélange.

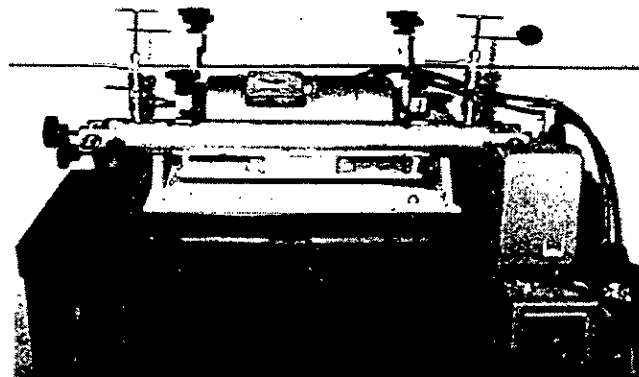
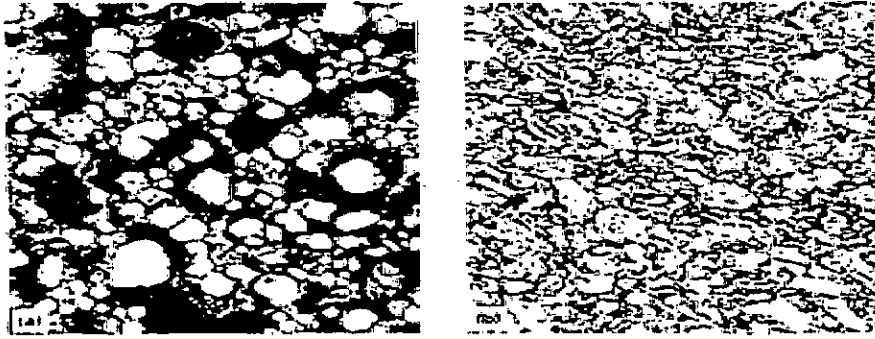


Figure 2.16 : Broyeur à boulets à vibration Mégapact [12]

Les forces d'impact qui agissent sur la poudre dans un broyeur à vibration sont une fonction du taux de broyage, de l'amplitude de vibration, et de la masse du milieu broyant. Les forces de broyage de haute énergie peuvent être obtenues en utilisant de hautes fréquences de vibration avec de petites amplitudes de vibration. Le broyeur montré dans la figure 2.16 opère à 3300 trs/min avec une amplitude de 2 mm atteignant un taux d'accélération maximal de 12.2 g (où g est l'accélération gravitationnelle). Les broyeurs destinés à de grandes productions opèrent à des fréquences de vibration relativement basses avec de grandes amplitudes.

Le broyeur à boulets à vibration est un excellent moyen de production d'alliage à l'état solide et des métaux consolidés par diffusion avec une capacité allant jusqu'à 4.5 kg ou plus, selon la densité apparente de la poudre. Les figures 2.17a et 2.17b montrent une microstructure d'un alliage Al-Fe-Ce et une micrographie électronique de la diffusion d'oxyde dans le même alliage après alliage à l'état solide dans un broyeur à vibration de même type que celui montré dans la figure 2.16



(a) poudre non traitée, rapidement solidifiée après pression à chaud. (b) poudre pressée à chaud rapidement solidifiée, après broyage de haute énergie dans un broyeur mégapact.

Figure 2.17 : Homogénéisation d'un alliage de Al-Fe-Ce au moyen de broyage à haute énergie [12]

Dans de grands broyeurs à tubes, (voire figure 2.18) le mouvement vibratoire du milieu décroît en allant des parois de la chambre au centre du tube, par conséquent, l'effet de broyage est plus faible au centre du broyeur comparé au voisinage des parois de la chambre.

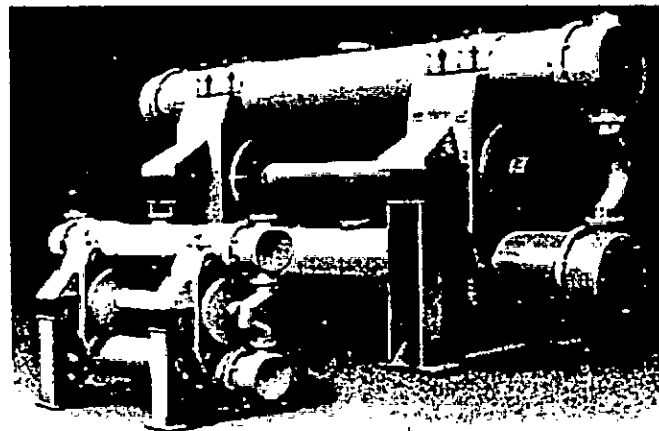


Figure 2.18 : Broyeur à vibration pilot [20]

Dans les broyeurs à vibration, le milieu de broyage reçoit des impulsions rapides avec un rapport proportionnel à la fréquence de vibration du broyage. Les forces d'impact agissant sur la poudre, dépassent les forces de cisaillement et de friction. Les broyeurs à vibration utilisent de petits boulets, à cause des grandes forces d'impact, fréquences et accélérations ; 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
- Proportionnel au diamètre des boulets
- Proportionnel au cube de la fréquence de vibration.
- Négligeable pour des vitesses inférieure à 900 à 1000 trs/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 les cylindres ou autres formes

2.4.6.2 Le broyeur à vibration SWECO : figure 2.19

Ces broyeurs sont équipés avec des chambres de broyage en forme de cylindres verticaux 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 haute fréquence. 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'intérieure 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'intérieure du milieu sont cassées par l'effet de l'impaction à haute fréquence.

Le milieu est emballé pour donner une densité d'empaquetage plus ou moins maximale. La masse empaquetée tourne lentement dans 'un plan horizontal, et s'élève légèrement au voisinage des parois extérieures de la chambre et descend en approchant les parois intérieures. Ce mouvement facilite la distribution de charges 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 métalliques. Il est particulièrement mal adaptable pour les métaux de hautes densités, car ces dernières causent l'entassement des particules qui deviennent plaquées.

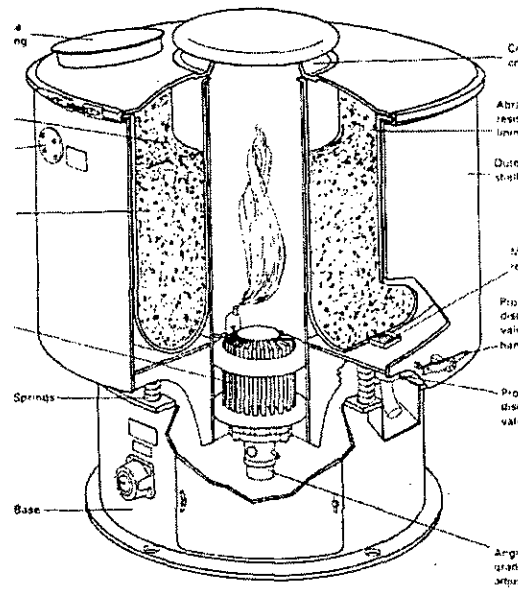


Figure 2.19 : Le broyeur SWECO pour le broyage humide à vibration [12]

CHAPITRE 3

LES BRONZES

3.1 PRESENTATION

Le bronze est un alliage de cuivre avec addition d'étain, bien que cette dénomination soit improprement utilisée pour désigner parfois d'autres alliages cuivreux tels que les cupro-aluminiums, les cupro-bérylliums ou les laitons au manganèse.

L'appellation bronze est par extension utilisée pour désigner les alliages ternaires cuivre - étain - zinc. L'élaboration des bronzes se fait généralement par fusion en milieu réducteur ce qui conduit à la désoxydation du métal avant coulée. Cette désoxydation étant effectuée le plus souvent au moyen de phosphore de cuivre, la plupart des bronzes renferment donc une certaine teneur résiduelle en phosphore de l'ordre de 0.03 à 0.1 % [21].

3.2 DIAGRAMME D'EQUILIBRE CU-SN

La figure (3.1) représente une partie du diagramme Cu-Sn relative aux bronzes binaires.

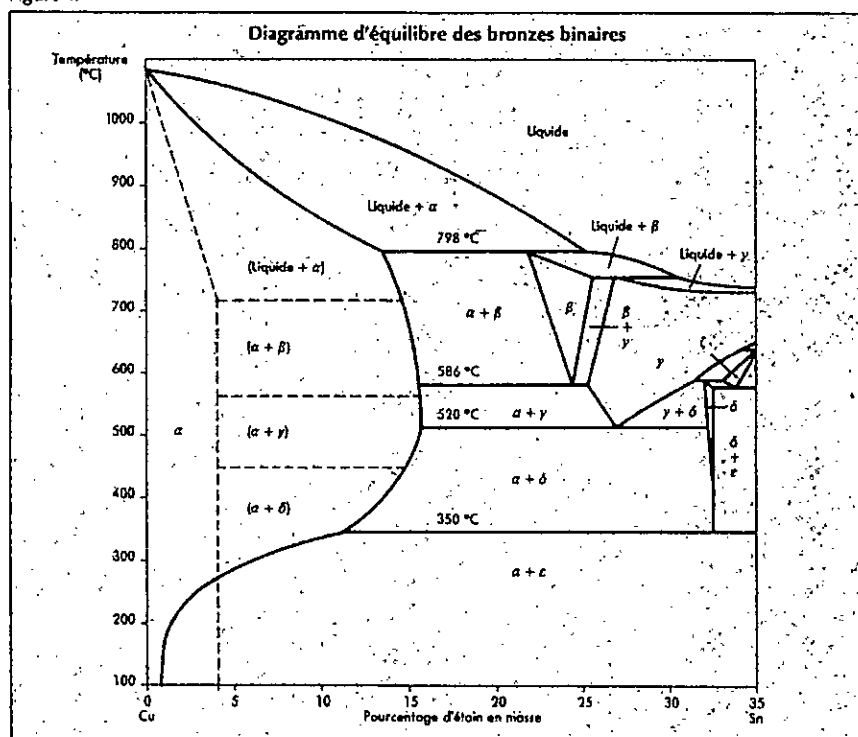
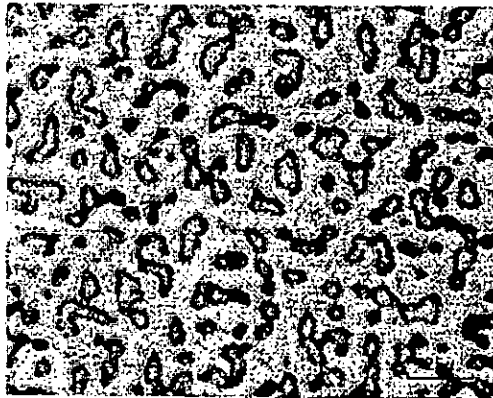


Figure 3.1 : Diagramme d'équilibre des bronzes binaires [21].

Ce diagramme fait apparaître une décomposition eutectoïde de la phase δ en dessous de 350°C ainsi qu'un rétrécissement du domaine de la phase α en dessous de 300°C , en réalité ces phénomènes ne sont observés qu'après de recuits de plusieurs centaines d'heures et en pratique on observe pas la phase ε . Le tracé en trait plein délimite les domaines des phases en équilibre, les lignes pointillées indiquent les limites pratiques de saturation de la phase α pour les états bruts de coulée (état hors équilibre).

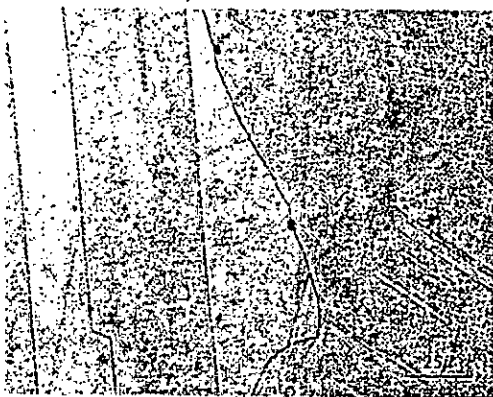
A l'état brut de fonderie, les bronzes ne sont donc constitués de phase α que pour une teneur en Sn inférieure à 4%. Au-delà, en raison des ségrégations de fonderie, ils représentent une structure $\alpha + \beta$ qui se transforme au refroidissement en $\alpha + \gamma$ puis en $\alpha + \delta$.

Les photos (3.2) et (3.3) illustrent deux types de structure de bronze à l'état brut de coulée et après traitement d'homogénéisation



CuSn6P

Figure 3.2 : Structure de bronze à l'état brut de coulée [21].



CuSn6P.

Figure 3.3 : Structure de bronze après traitement d'homogénéisation [21].

3.3 PROPRIETES PHYSIQUES DES BRONZES

Les bronzes sont de couleur rose lorsque la teneur en étain n'excède pas 5%, ils prennent une teinte or de plus en plus foncée jusqu'à 15 % d'étain, teinte qui pâlit lorsque le taux d'étain croit au-delà de 15%. Le tableau suivant les propriétés physiques des principaux bronzes.

	CuSn12	CuSn5 Pb20	CuSn10 Pb10	CuSn5 Pb5Zn5	CuSn7 Pb6Zn4
Température du liquidus (°C)	1000	930	940	1010	980
Température du solidus (°C)	820	760	850	855	850
Intervalle de solidification (°C)	180	170	90	155	130
Masse volumique à 20 °C (Kg/dm ³)	8,7	9,3	9,3	8,8	8,8
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	18	18	18	18	18
Capacité thermique à 20°C (j/Kg.K)	376	376	376	376	376
Conductivité thermique à 20 °C (W/(m.K))	46	46	50	71	59
Conductivité électrique à 20°C (% IACS)	10	10	11	15	12
Résistivité électrique à 20°C (10 ⁻⁸ Ω.m)	17,2	17,2	15,7	11,5	14,4

Tableau N° 3.1 : Propriétés physiques des bronzes de fonderie [21]

3.4 CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES BRONZES

3.4.1 Caractéristiques de traction et de dureté

Les bronzes monophasés peuvent acquérir par écrouissage (laminage, tréfilage, étirage à froid) des caractéristiques mécaniques relativement élevées. A l'état recuit les caractéristiques mécaniques sont fonction de la taille de grain obtenue, dans les bronzes à deux phases (pièces de fonderie), les caractéristiques mécaniques sont trop fortement influencées par le teneur en composé δ , donc par les

condition de refroidissement, pour qu'il soit possible d'indiquer des valeurs précises en fonction de la seule composition.

Cependant, les progrès réalisés, tant dans les techniques d'élaboration et de fusion des alliages, que dans les méthodes de moulage, permettent d'obtenir couramment des pièces de haute qualité et de caractéristiques suivies.

Les caractéristiques mécaniques des principaux bronzes moulés sont les suivantes:

	Mode d'obtention	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2 % (Mpa)	Allongement (A%)
CuSn8	Y20	250	130	16
	Y30	220	130	2
CuSn12	Y20	240	130	5
CuSn12P	Y20	240	130	13
	Y30	240	150	13
	Y70-80	270	150	15
CuSn5Pb20	Y20	150	60	5
	Y70-80	180	80	7
CuSn10Pb10	Y20	180	80	7
	Y70-80	220	140	6
CuSn5Pb5Zn5	Y20	200	90	12
	Y30	250	100	12
CuSn7Pb6Zn4	Y20	220	100	12
	Y30	260	120	12

Tableau N° 3.2 Caractéristiques mécaniques des bronzes de fonderie

Où :

Y20: moulé au sable, sans traitement thermique;

Y30: moulé en coquille, sans traitement thermique;

Y70: moulé en coulée continue, sans traitement thermique;

Y80: moulé par centrifugation, sans traitement thermique.

3.4.2 Constantes d'élasticité

Le module de Young E (élasticité de traction) et le module de torsion G (élasticité de cisaillement) sont donnés pour les bronzes de fonderie obtenus en moule en sable (Y20), dans le tableau suivant:

	Module de Young (MPa)	Module de torsion
CuSn12P	105 000	39 000
CuSn5Pb20	75 000	28 000
CuSn10Pb10	75 000	28 000
CuSn5Pb5Zn5	100 000	37 000
CuSn7Pb6Zn4	100 000	37 000

Le coefficient de poisson pour ces alliages est voisin de 0.35

Tableau N° 3.2 Constantes d'élasticité des bronzes de fonderie [21]

PROCEDURE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 4

CONCEPTION ET REALISATION D'UN BROYEUR

4.1 INTRODUCTION

Tout travail de recherche à pour but de servir l'industrie, d'une façon rentable et efficace. Dans cette optique, nous avons conçu et réalisé un broyeur dont le but est de produire des poudres métalliques à partir des copeaux d'usinage. Ainsi, le recyclage de ces déchets industriels peut s'avérer très économique si l'équipement de broyage est efficace. Le broyeur à lames que nous avons réalisé, a pour objectif d'affiner au maximum la poudre obtenue à partir du broyage à grande vitesse des déchets d'usinage en un temps minimal.

4.2 DESCRIPTION DU BROYEUR

Le broyeur est constitué essentiellement, d'une chambre de broyage qui a une forme semi-circulaire. A l'intérieur de cette chambre, un disque sous forme d'une poulie est fixé sur un arbre à l'aide d'une goupille. L'arbre est couplé à un moteur électrique à vitesse variable à travers un joint d'Oldham qui a pour but de corriger un manque de coaxialité entre les deux arbres. Sur la circonférence du disque, huit outils de broyage sont fixés à travers des tiges filetées et des écrous de freinage. La chambre de broyage est fermée par un couvercle sur lequel sont soudés des outils fixes sur une trajectoire circulaire. Le couvercle est monté sur la chambre grâce à deux tiges filetées dont la rotation permet de régler l'écartement (le gap) entre les outils fixes et les outils mobiles de broyage. L'ensemble est fixé sur un châssis de forme rectangulaire.

4.3 CONCEPTION ET REALISATION DES DIFFERENTES PIECES DU BROYEUR

4.3.1 La chambre de broyage

La chambre de broyage est fabriquée en utilisant une tôle de 2 mm d'épaisseur. Elle a une forme rectangulaire en haut et est semi-circulaire en bas avec un rayon de 125 mm. Son volume est d'environ 7600 cm³. Une petite ouverture au bas de la chambre est aménagée pour récupérer la poudre broyée. Cette ouverture est fermée par une glissière. Le haut de la chambre est fermé par un couvercle fixé à l'aide de deux tiges filetées de 16 mm de diamètre. Le schéma (2) montre le dessin de définition de la chambre avec les cotations correspondantes.

4.3.2 La roue de broyage

La roue de broyage a été usinée par tournage à partir d'un disque pris sur un lingot d'aluminium de 200 mm de diamètre. Une fois usinée, une série de 8 trous de diamètre 8 mm ont été percés sur la roue puis taraudés pour loger des portes outils de diamètre M 10. L'espace entre les trous est maintenu constant sur la roue pour permettre à celle-ci de tourner en équilibre. La roue porte outils est l'élément principal du broyeur ses dimensions sont montées dans le schéma (3).

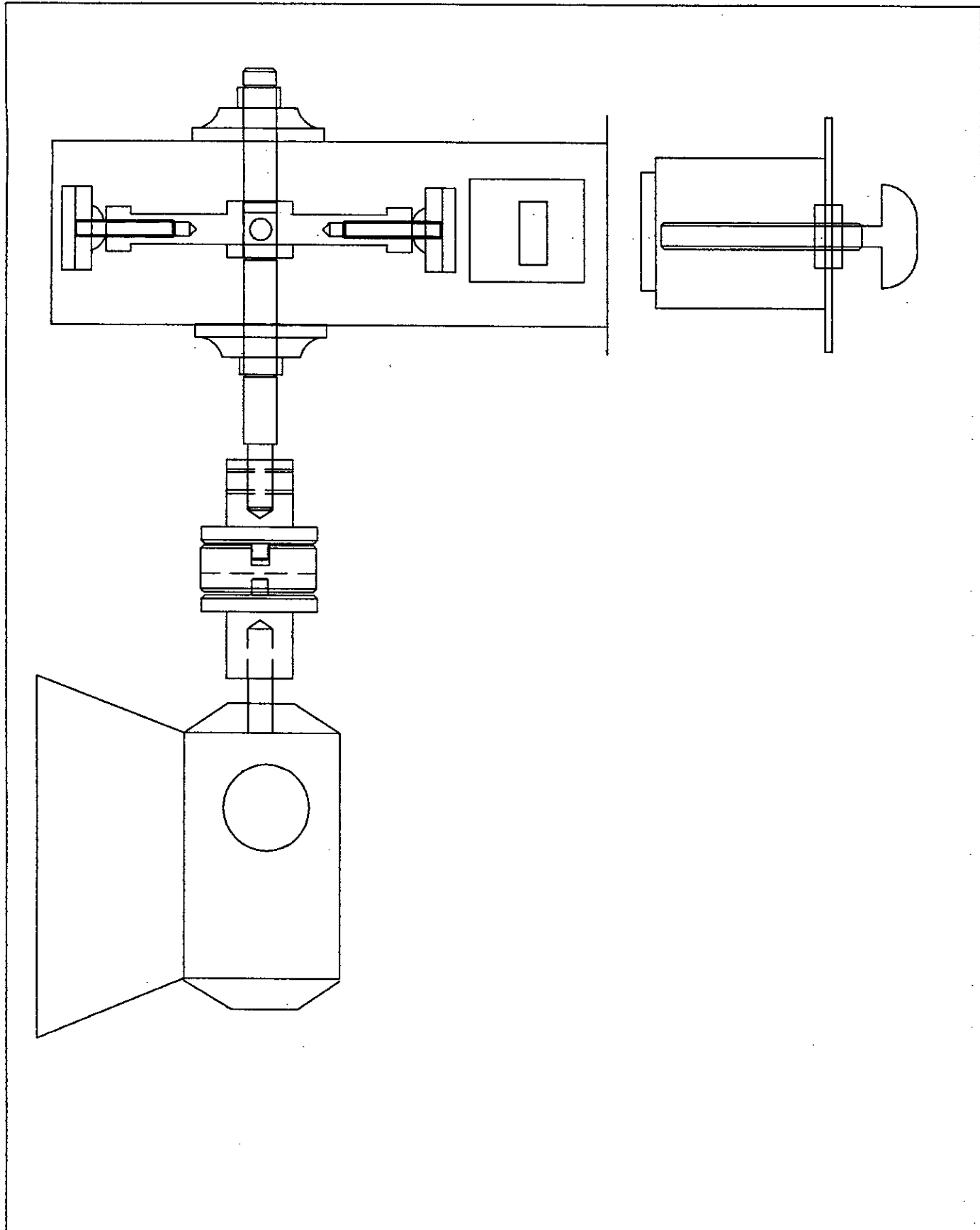
4.3.3 Les outils de broyage mobiles

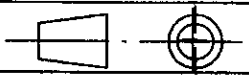
Ce sont des lames ou des hélices conçues à partir d'une barre d'acier mi-dure dont la forme est carrée de 18 mm de côté. La barre a été coupée en huit pièces de 50 mm de longueur. Les pièces sont ensuite usinées à l'aide d'une fraiseuse pour leur donner la forme d'outils tranchants de forme trapézoïdale puis percées et taraudées au centre de la surface plane, d'une pénétration de 10 mm. Les outils ainsi obtenus sont ensuite vissés puis soudés sur des tiges filetées de 50 mm de longueur et 10 mm de diamètre. Les tiges portes outils sont alors vissées sur la roue de broyage, et serrées par un contre pour éviter le desserrage des lames lors du broyage. le schéma (4) montre le dessin de définition de ses outils.

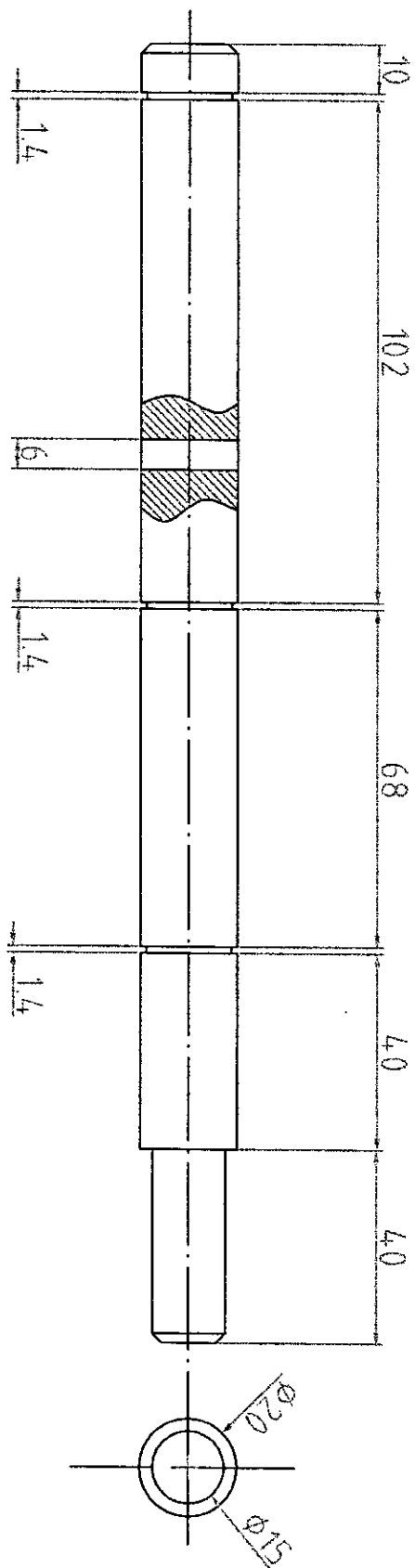
4.3.4 Le couvercle

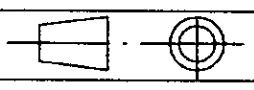
Le couvercle permet de fermer la chambre de broyage qui devient ainsi complètement étanche. Sur la surface intérieure du couvercle, une série d'outils fixes ont été soudés. Ces outils jouent le rôle de substrat sur lesquels viennent s'écraser les copeaux accélérés par la roue porte outils qui tournent à grande vitesse. En percutant ces outils fixes les copeaux se broient par cisaillement et par impact. Le couvercle est fabriqué en tôle de 4 mm, soudé sur tous les côtés. Les lames sont fabriquées à partir d'une barre carrée, d'acier mi-dur, de 18 mm de côté et de 80 mm de longueur. La surface intérieure du couvercle sur laquelle sont soudés les outils fixes, est courbée avec un rayon de 125 mm de telle façon que ce rayon soit le même que celui de la chambre de broyage. Le schéma (5) montre le dessin de définition de cette pièce avec la cotation dimensionnelle correspondante.

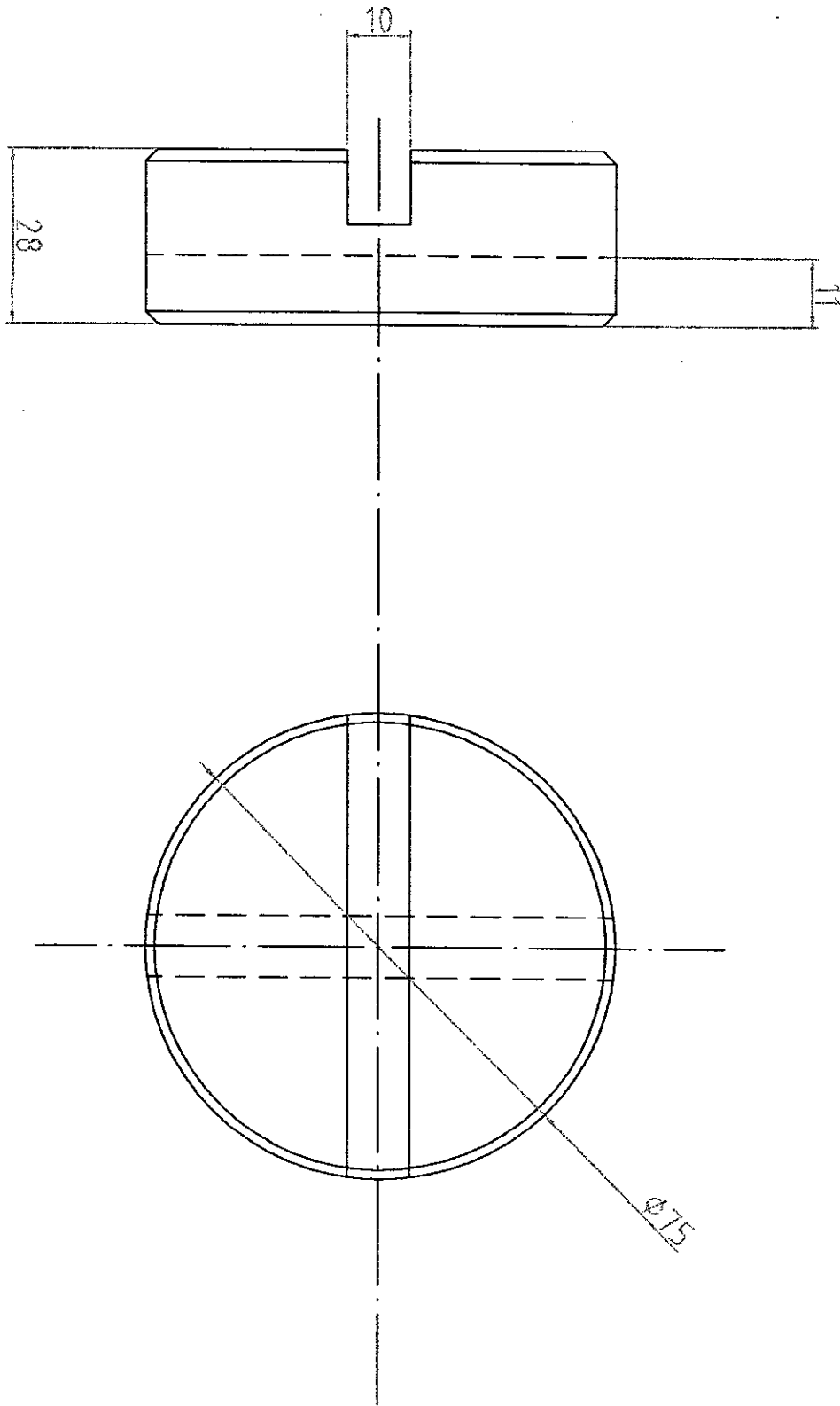
Tous les dessins de définition du broyeur sont représentés dans les schémas qui suivent :




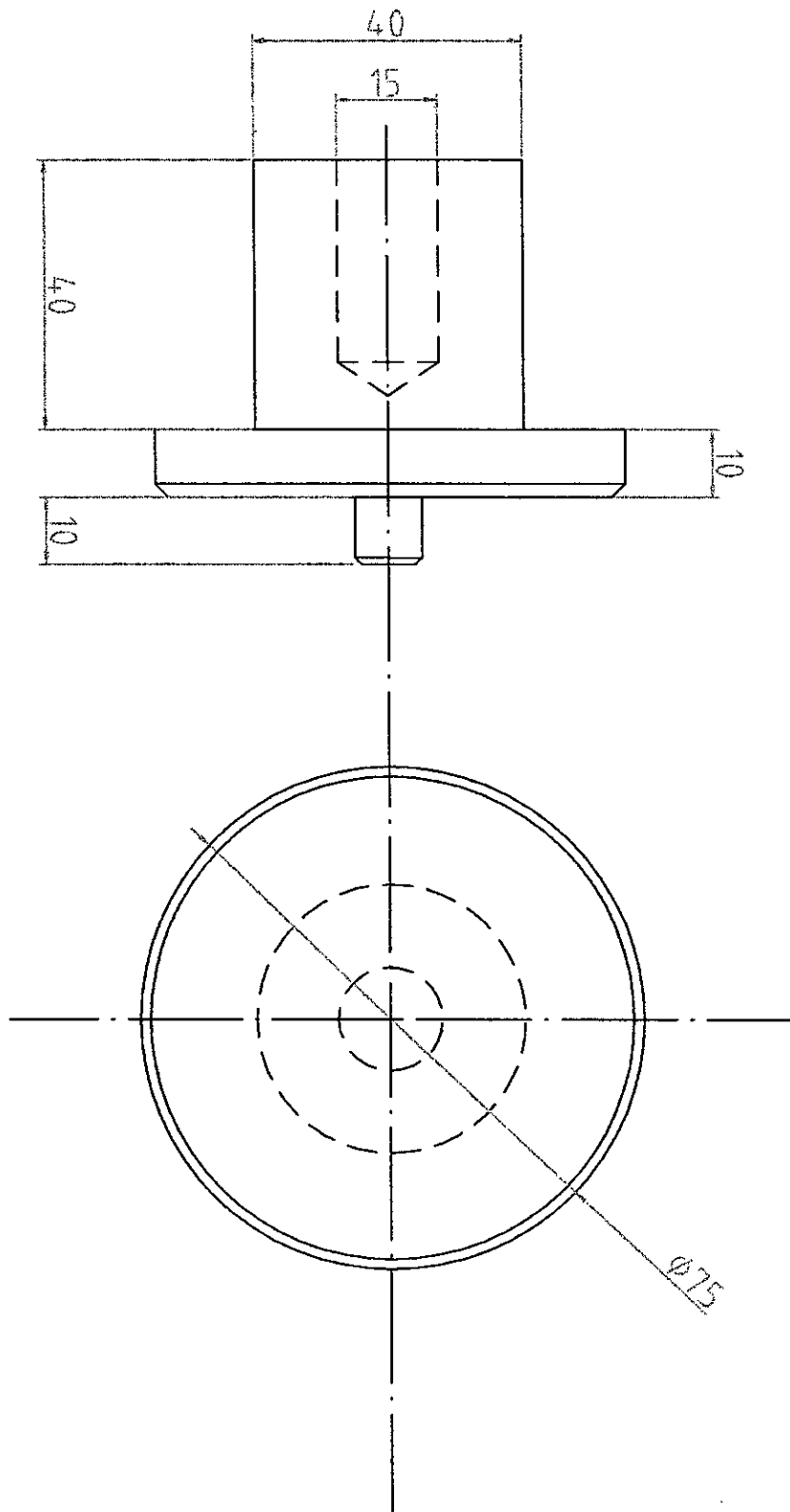
ECH:1/3	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUIN : 03
	SCHEMA DE DEFINITION	SCHEMA N°10
FORMAT A4		Nbre : 1

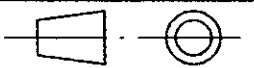


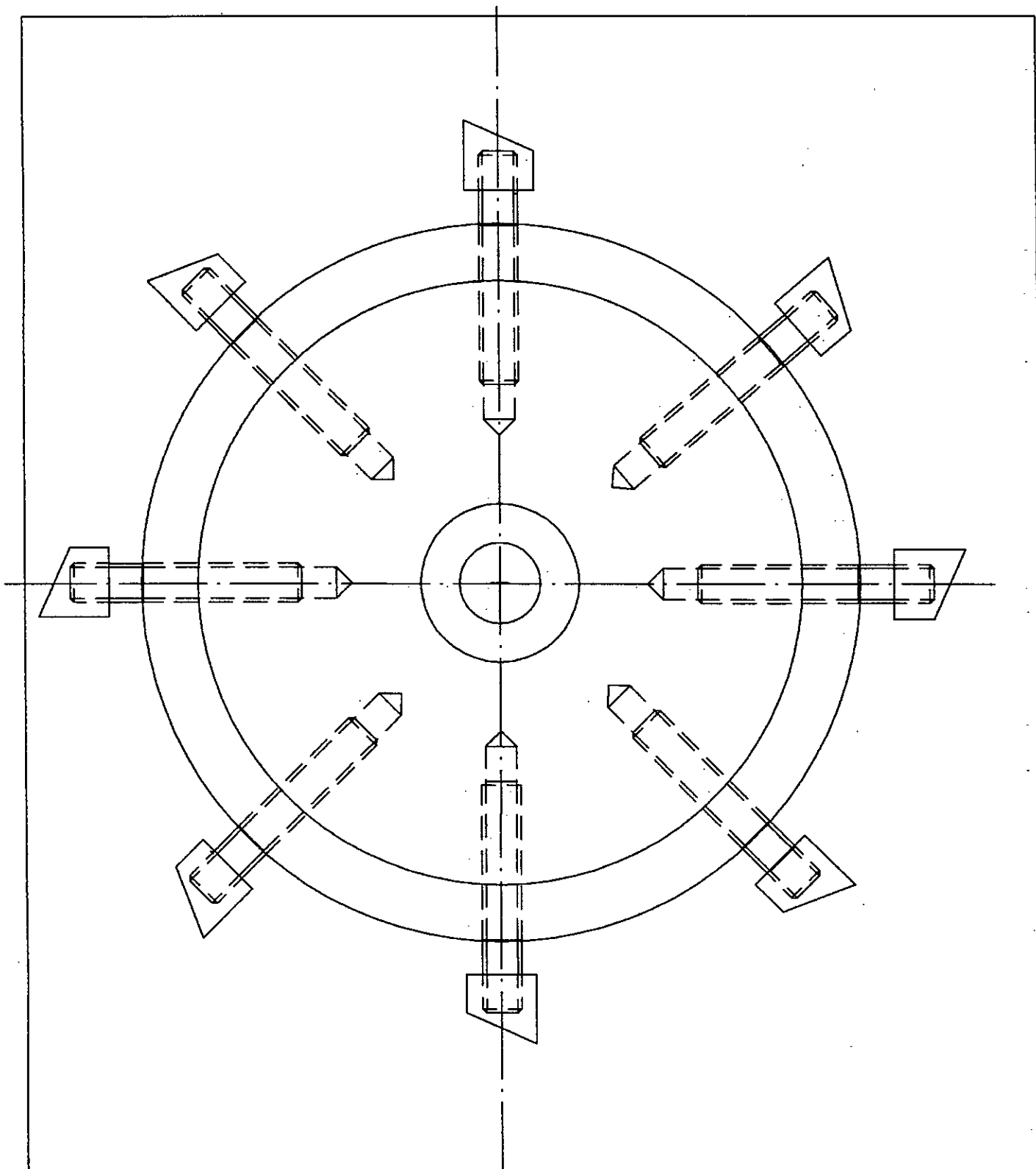
ECH:3/4	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUIN : 03
	AXE PORTE ROUE	SCHEMA N° 9
FORMAT A4		Nbre : 1

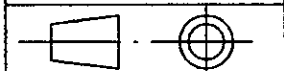


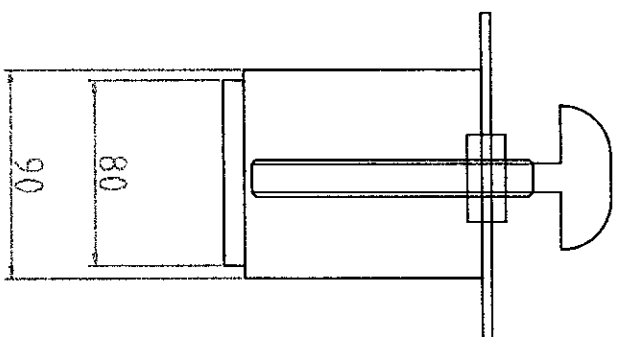
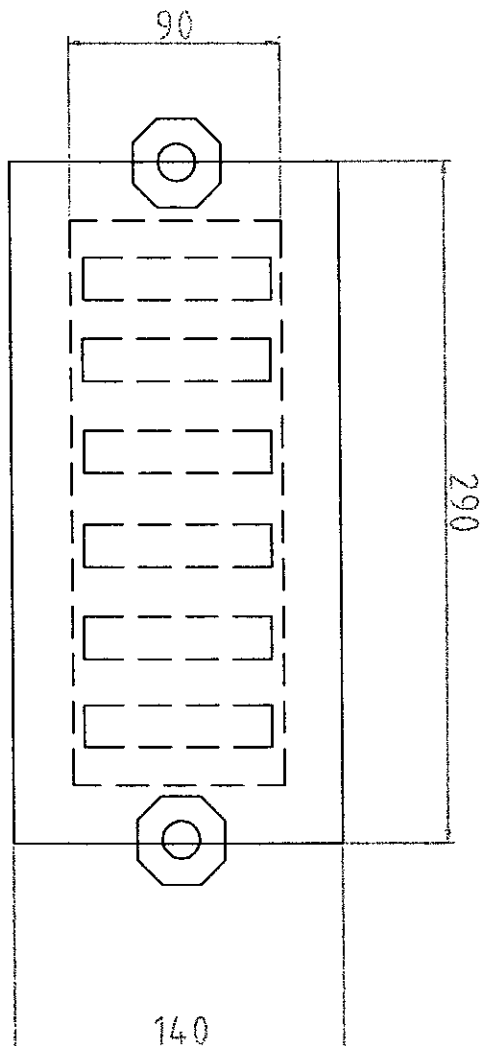
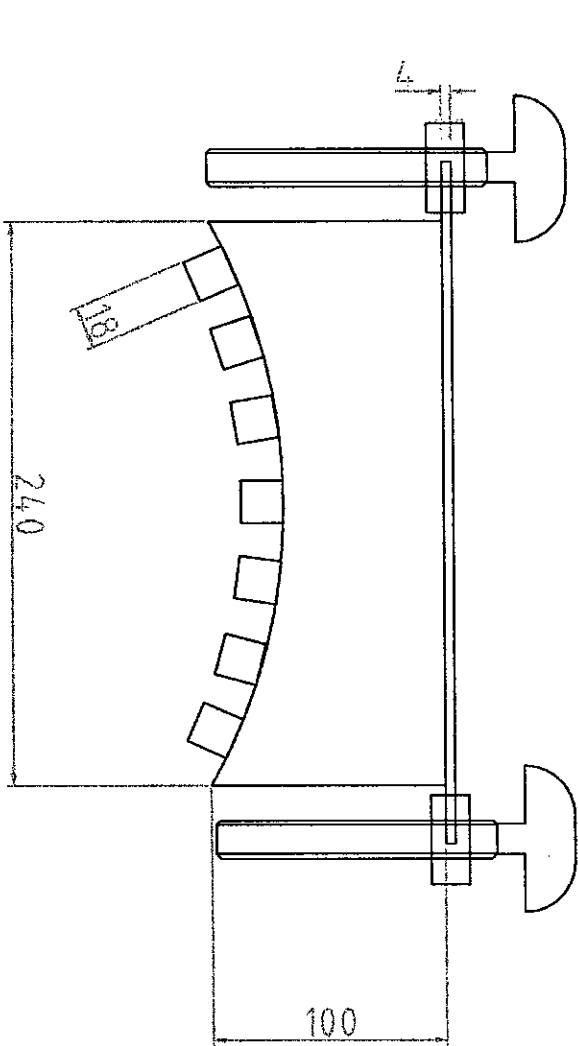
ECH : 1	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUIN : 03
	PIECE FEMELLE DU JOINT D'OLDHAM	SCHEMA N° 8
FORMAT A4		Nbre : 1

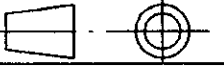


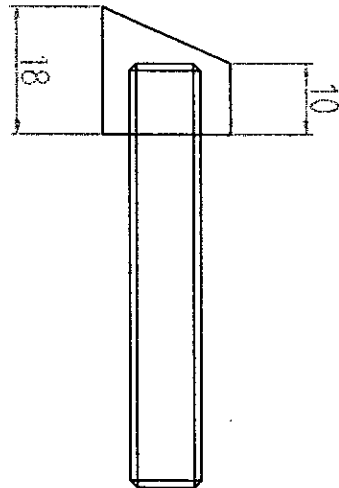
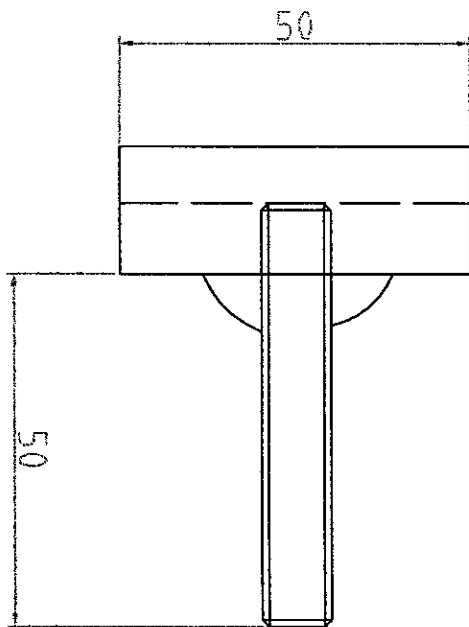
EHC: 1	ENP - Dpt : METALLURGIE	JOUIN : 03
	PIECE MALE DU JOINT D'OLDHAM	SCHEMA N° 7
FORMAT A4		Nbre : 2

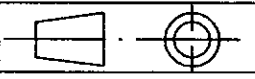


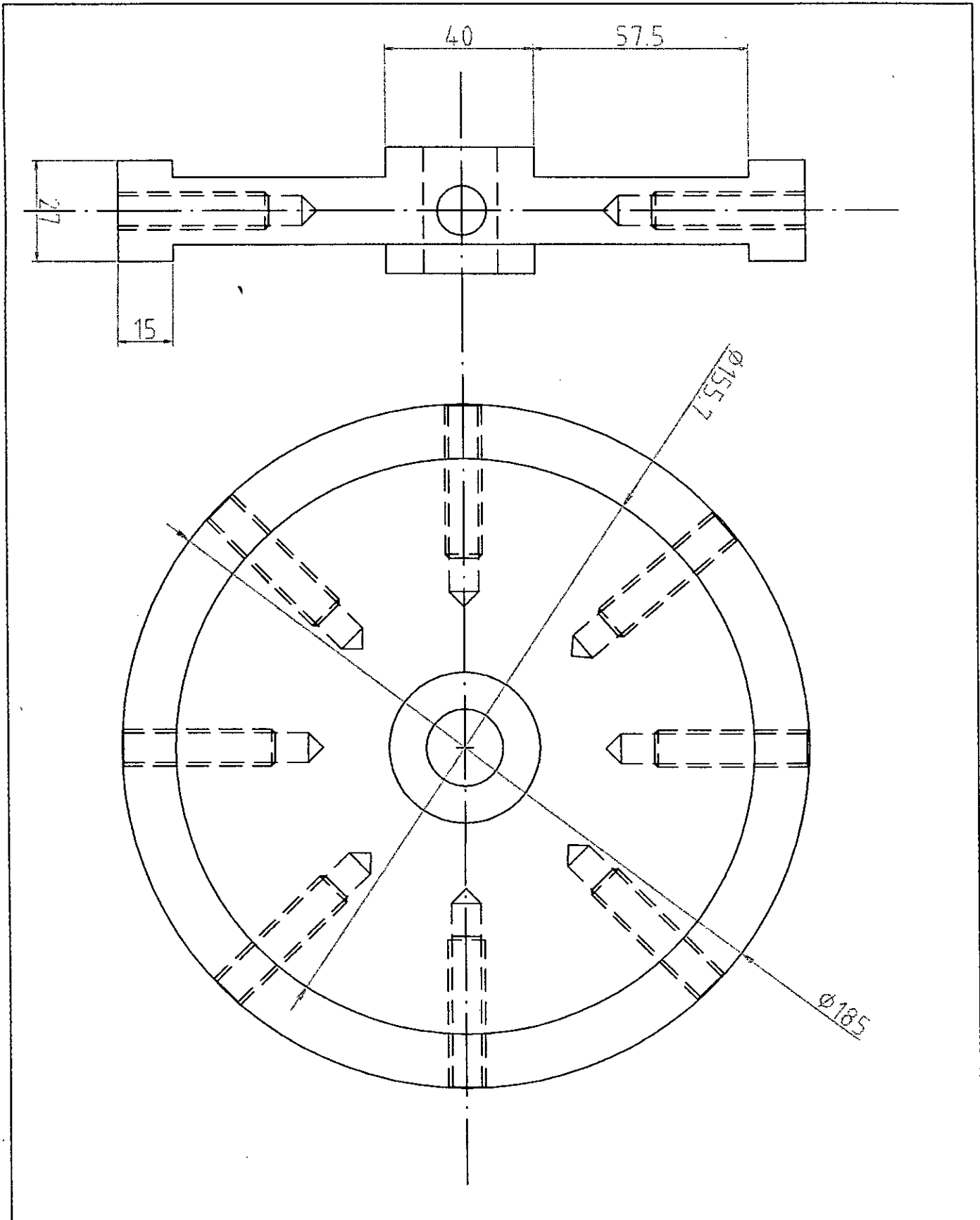
ECH : 3/4	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUN : 03
	OUTILS DE BROUAGE FIXES	SCHEMA N° 6
FORMAT A4	SUR LA ROUE	Nbre : 1



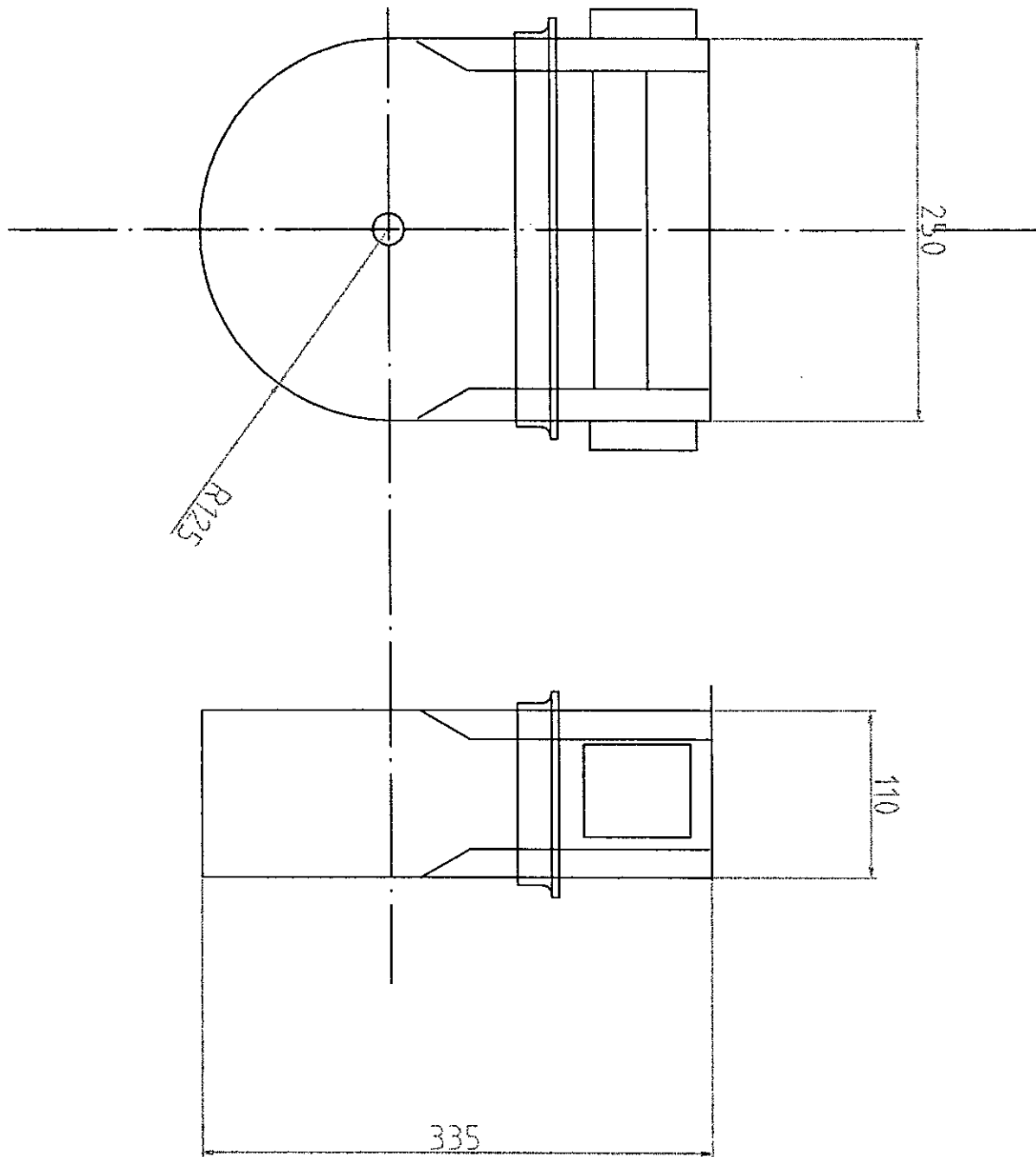
ECH:1/3	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUN : 03
	COUVERCLE PORTE OUTILS FIXES	SCHEMA N° 5
FORMAT A4		Nbre : 1

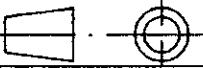


ECH : 1	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUIN : 03
	OUTILS DE BROUAGE	SCHEMA N° 4
FORMAT A4		Nbre : 8

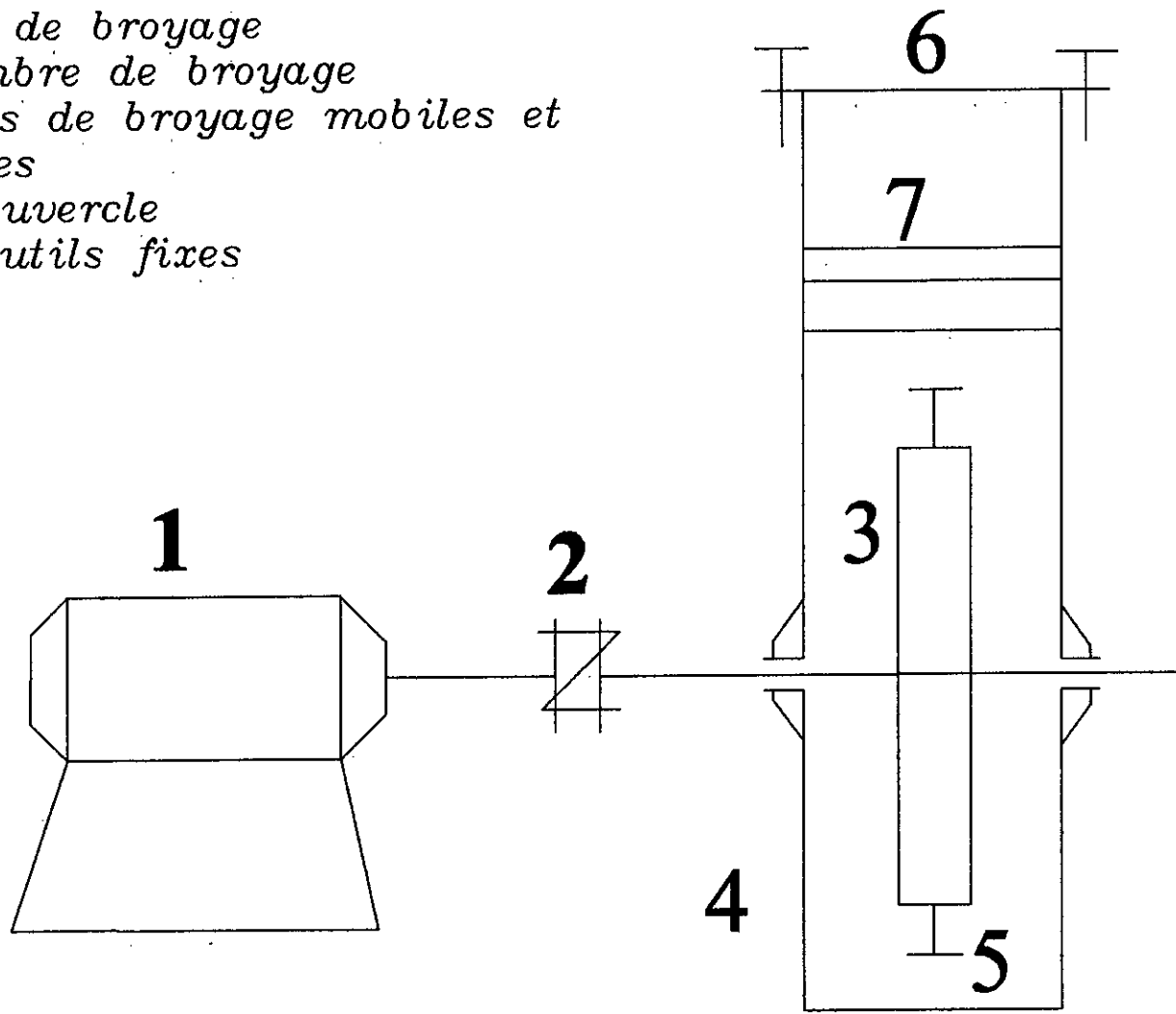


ECH : 3/4	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUIN : 03
	ROUE DE BROYAGE	HEMA N° 3
FORMAT A4		Nbre : 1



ECH : 1/4	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUIN : 03
	CHAMBRE DE BROYAGE	SCHEMA N° 2
FORMAT A4		Nbre : 1

- 1 moteur
- 2 joint d'Oldham
- 3 roue de broyage
- 4 chambre de broyage
- 5 outils de broyage mobiles et réglables
- 6 le couvercle
- 7 les outils fixes



	ENP - Dpt : METALLURGIE	JUIN : 03
FORMAT A4	SCHEMA DE DEFINITION	SCHEMA N° 1
		Nbre : 1

CHAPITRE 5

ELABORATION DES POUDRES ET OPTIMISATION DES PARAMETRES DE BROYAGE

5.1 INTRODUCTION

Le recyclage des déchets provenant de l'usinage des pièces métallique, 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, puis on procède à la mise en forme de cette poudre par compactage, puis leur consolidation par un frittage pour leurs donner les propriétés voulues.

Plusieurs paramètres de broyage influent sur la forme et la taille moyenne des particules de poudre obtenue. Le broyeur que nous avons conçu présente au moins six variables, lesquelles si elles sont bien combinées peuvent permettre l'obtention d'un bon produit. Ces variables sont :

- a. Le temps de broyage
- b. La charge broyée.
- c. La taille initiale des copeaux.
- d. La vitesse de broyage.
- e. Le nombre d'outils
- f. La distance entre les outils et les contre lames.

En raison du temps limité alloué pour ce PFE, nous nous proposons d'analyser l'influence de seulement les quatre premiers paramètres du broyeur conçu sur la forme et la taille des particules à savoir :

- L'influence de la masse broyer.
- L'influence du temps de broyage.
- L'influence de la taille initiale des copeaux
- L'influence de la vitesse de broyage

5.2 BUT DE CE TRAVAIL

Ce travail a pour but la production d'une poudre de bronze à partir des copeaux d'usinage. Ces derniers sont produits par usinage au tour à partir d'un lingot cylindrique obtenu par coulée en coquille. Le programme commence par la production des copeaux puis les caractériser par tamisage et pesée des différents refus. Une fois leur taille moyenne calculée, une masse précise est introduite dans le broyeur pour être transformée en poudre, sous l'action d'une combinaison de quelques paramètres de broyage bien définis. Après sa collecte, la poudre obtenue est caractérisée par tamisage et pesée des différents refus pour déterminer sa taille moyenne. Finalement, on caractérise la forme des particules de poudre obtenue, par microscopie électronique à balayage. Cette opération n'est faite qu'après l'avoir

décapée et rincée, pour la débarrasser des différents dépôts accumulés sur sa surface pendant le broyage.

5.3 DESCRIPTION DES OPERATIONS

5.3.1 Fabrication des copeaux

On fabrique les copeaux à partir d'un lingot cylindrique de bronze par usinage à l'aide d'un tour. Le choix de fabriquer les copeaux au lieu de les récupérer dans un atelier d'usinage, nous donne la possibilité de contrôler leur taille et leur forme initiale, 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

Pour étudier l'influence de la taille initiale des copeaux sur la taille moyenne de la poudre obtenue, on a fabriqué trois gammes de copeaux de différentes tailles (fine, moyenne et grossière). La vitesse de rotation du mandrin est fixée à 600 tr/min et la vitesse d'avance de l'outil à 1 mm/s. Les trois gammes de copeaux sont fabriquées comme suit:

Copeaux fins :

- L'outil utilisé est un outil droit à charioter, en manœuvre automatique.
- La pénétration de l'outil selon l'axe transversal du barreau cylindrique est de 0.04 mm sur le rayon.

Copeaux moyens :

- L'outil utilisé est un outil droit à charioter, en manœuvre automatique.
- La pénétration de l'outil selon l'axe transversal du barreau cylindrique est de 0.1 mm sur le rayon.

Copeaux grossiers :

- L'outil utilisé est un outil à charioter coudé à gauche à 45°.
- La pénétration de l'outil et le chariotage se fait manuellement pour avoir des copeaux grossiers et minces et éviter le problème d'échauffement.

5.3.2 Caractérisation des copeaux

Les trois gammes de copeaux sont caractérisées séparément en plaçant une quantité de 500 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 (8 tamis) sont placés dans une machine à vibrations pendant un temps de 15 min. 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.

5.3.3 Présentation de l'opération de broyage

En utilisant le broyeur fabriqué et décrit dans le chapitre 4, les copeaux placés à l'intérieur du broyeur sont entraînés par les outils formant un nuage de particules semblable à une espèce de tornade ou un tourbillon formés par un vent violent. Ainsi, les copeaux sont percutés à très grande vitesse par les outils du broyeur qui sont fixés sur le disque porte outils. Celui-ci est couplé à un moteur électrique à vitesse variable et réglable pouvant atteindre un maximum de 2000 tr/min. les copeaux sont percutés sur le couvercle où sont fixées les contre lames en acier. Après plusieurs impacts, les copeaux sont cisailés, s'écroutissent et engendrent des cracks et des fissures. Ceci permettra après d'autres impacts aux particules, de se désintégrer en plusieurs particules fines.

5.3.4 Description de la balance électronique

La balance électronique a été utilisée pour peser les copeaux utilisés, ainsi que les différents refus retenus par chaque tamis. C'est une balance à affichage digital avec une précision de 0.1 gramme. La balance possède quatre appuis réglables qui permettent de régler la palette 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.

5.3.5 Description 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.

5.3.6 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 15 min. Le principe de fonctionnement est basé sur la génération de vibrations de hautes fréquences grâce à un moteur électrique lié à un système de fixation composé de deux anneaux. Un anneau où repose les tamis, et un anneau supérieur qui permet le serrage et la

fixation des tamis. L'ensemble est fixé sur un châssis couplé au moteur qui permet la transmission des vibrations à toute la série de tamis.

5.3.6 Décapage des surfaces des particules de poudre

Après l'opération de broyage des poudres, et pour une meilleure observation microscopique, on effectue un décapage des surfaces des particules de poudres, en utilisant une solution décapante. Cette dernière est composée de 55 cc d'acide phosphorique, 25 cc d'acide nitrique et 20 cc d'acide ascétique. On met la poudre dans cette solution, et on laisse réagir pendant un certain temps (5 à 10s), puis on enlève la poudre, et on la lave avec de l'eau pour éviter la réaction du bronze avec la solution. En fin on laisse la poudre sécher pour éliminer l'humidité de celle-ci.

CHAPITRE 6

PRESENTATION DES RESULTATS

6.1 CARACTERISATION DES COPEAUX

Après avoir fabriquer des copeaux de bronze par usinage au tour, en utilisant la technique de caractérisation décrite dans le chapitre 5, on obtient les résultats de la caractérisation dans les tableaux suivants : masse des copeaux tamisés est de 250 grs pour les copeaux moyens, et 500 grs pour les copeaux fins et grossiers.

Résultats du tamisage :

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
850	0,5	0,1
600	7,5	1,5
425	51,5	10,3
300	199,3	39,8
212	155,3	31,1
150	76,6	15,3
106	5,5	1,1
75	1,5	0,3
bas fond	2,6	0,52

Tableau 6.1 : Copeaux fins
($D_m = 318.122 \mu\text{m}$)

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
850	1,1	0,44
600	141,91	56,76
425	59,5	23,8
300	35,1	14,04
212	2	0,8
150	3,7	1,48
106	2,4	0,96
bas fond	4,1	1,64

Tableau 6.2 : Copeaux moyens
($D_m = 594.973 \mu\text{m}$)

tamis (µm)	Refus (gr)	(%)
5000	0,2	0,04
3350	10,6	2,12
2500	44,2	8,84
1700	121,2	24,24
1250	91	18,2
850	39,9	7,98
600	102,5	20,5
bas fond	90	18

Tableau 6.3 : Copeaux grossiers
($D_m = 1412.985 \mu\text{m}$)

Après tamisage de 500 grs pour les copeaux fins et grossiers, et 250 grs pour les copeaux moyens, on calcule la taille moyenne des copeaux en utilisant la formule suivante :

$$D_m = O_1 X_1 + \frac{O_1 + O_2}{2} X_2 + \frac{O_2 + O_3}{2} X_3 + \dots + \frac{O_n + O_{n+1}}{2} X_{n+1} \quad (6.1)$$

Où

D_m : la taille moyenne des particules en μm ;

O_1, O_2, \dots, O_n : ouvertures des tamis en μm ;

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

6.2 RESULTATS DU BROYAGE DES COPEAUX D'USINAGE

Après caractérisation des copeaux, on a procédé au broyage de ces copeaux en utilisant le broyeur réalisé, les paramètres de broyage optimisés sont :

- Le temps de broyage;
- La charge broyée;
- La taille du copeau initial;
- La vitesse de broyage.

Les résultats de broyage sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

6.2.1 Etude de l'influence du temps de broyage et de la masse initiale des copeaux

6.2.1.1 Broyage des copeaux à taille initiale moyenne

a) Masse broyée 250 grs

- Diamètre moyen des copeaux initiaux $D_{mi} = 594.973 \mu\text{m}$;
- Vitesse de broyage $V = 2000 \text{ trs/min}$;
- 8 outils de broyage;
- Distance (e) minimale (où e est la distance entre les outils mobiles et les outils fixes).

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	4,2	15,6
315	35,2	13,13
212	55,2	20,59
150	102,8	45,07
106	15,8	5,89
75	9,7	3,62
53	7,3	2,72
38	6,4	2,38
bas fond	14,2	5,29

**Tableau 6.4 : Résultats de tamisage
après 1 h de broyage
($D_m = 203.244 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	1,3	0,5
315	11,7	4,56
212	60,1	23,46
150	112,9	44,08
106	17,4	6,79
75	13,6	5,31
53	19,6	7,65
38	8,9	3,47
bas fond	9,2	3,59

**Tableau 6.5 : Résultats de tamisage
après 2 h de broyage
($D_m = 181.354 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	1	0,37
315	4,8	1,77
212	44,7	16,55
150	102,4	37,92
106	27	10
75	23,1	8,55
53	44,8	16,59
38	12,1	4,48
bas fond	8,3	3,07

**Tableau 6.6 : Résultats de tamisage
après 4 h de broyage
($D_m = 154.206 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	0,7	0,26
315	4,8	1,83
212	45,4	17,31
150	73	27,84
106	34	12,96
75	25,2	9,61
53	53,5	20,4
38	17	6,48
bas fond	10,1	3,85

**Tableau 6.7 : Résultats de tamisage
après 8 h de broyage
($D_m = 145.962 \mu\text{m}$)**

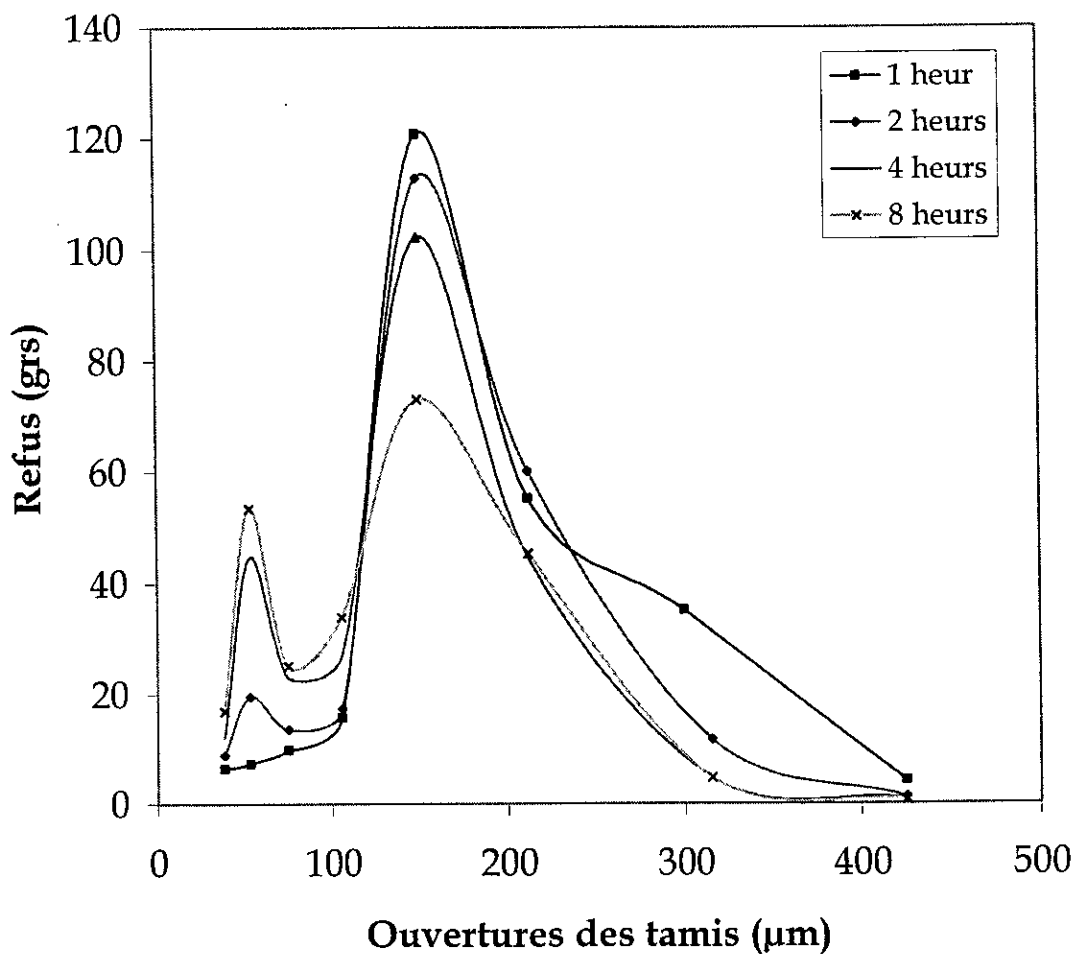


Figure 6.1 : Distribution de la taille après un broyage de 1, 2, 4 et 8 heures pour une masse broyée de 250 grs.

b) Masse broyée 500grs

- Diamètre moyen des copeaux initiaux $D_{mi} = 594.973 \mu\text{m}$;
- Vitesse de broyage $V = 2000 \text{ trs/min}$;
- 8 outils de broyage;
- Distance (e) minimale.

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	15,4	3,1
315	54,2	10,91
212	154,2	31,05
150	204,8	41,24
106	17,8	3,58
75	8,2	1,65
53	8,1	1,63
38	9,2	1,85
bas fond	23,2	4,67

**Tableau 6.8 : Résultats de tamisage
après 1 h de broyage
($D_m = 205.74 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	3,8	0,76
315	33,9	6,82
212	134,3	27,04
150	224,2	45,15
106	25,9	5,21
75	13,9	2,79
53	14,6	2,94
38	14,5	2,92
bas fond	33,4	6,72

**Tableau 6.9 : Résultats de tamisage
après 2 h de broyage
($D_m = 191,97 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	1,8	0,36
315	15,7	3,2
212	95,4	19,46
150	217,2	44,3
106	32,42	6,61
75	20,4	4,16
53	22,8	4,65
38	21,7	4,42
bas fond	59,1	12,05

**Tableau 6.10 : Résultats de tamisage
après 4 h de broyage
($D_m = 164.403 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	1,7	0,34
315	8,9	1,81
212	77,4	15,77
150	188,6	38,44
106	32,8	6,68
75	45,1	9,18
53	43,1	8,78
38	23,1	4,7
bas fond	66,9	13,63

**Tableau 6.11 : Résultats de tamisage
après 8 h de broyage
($D_m = 146.41 \mu\text{m}$)**

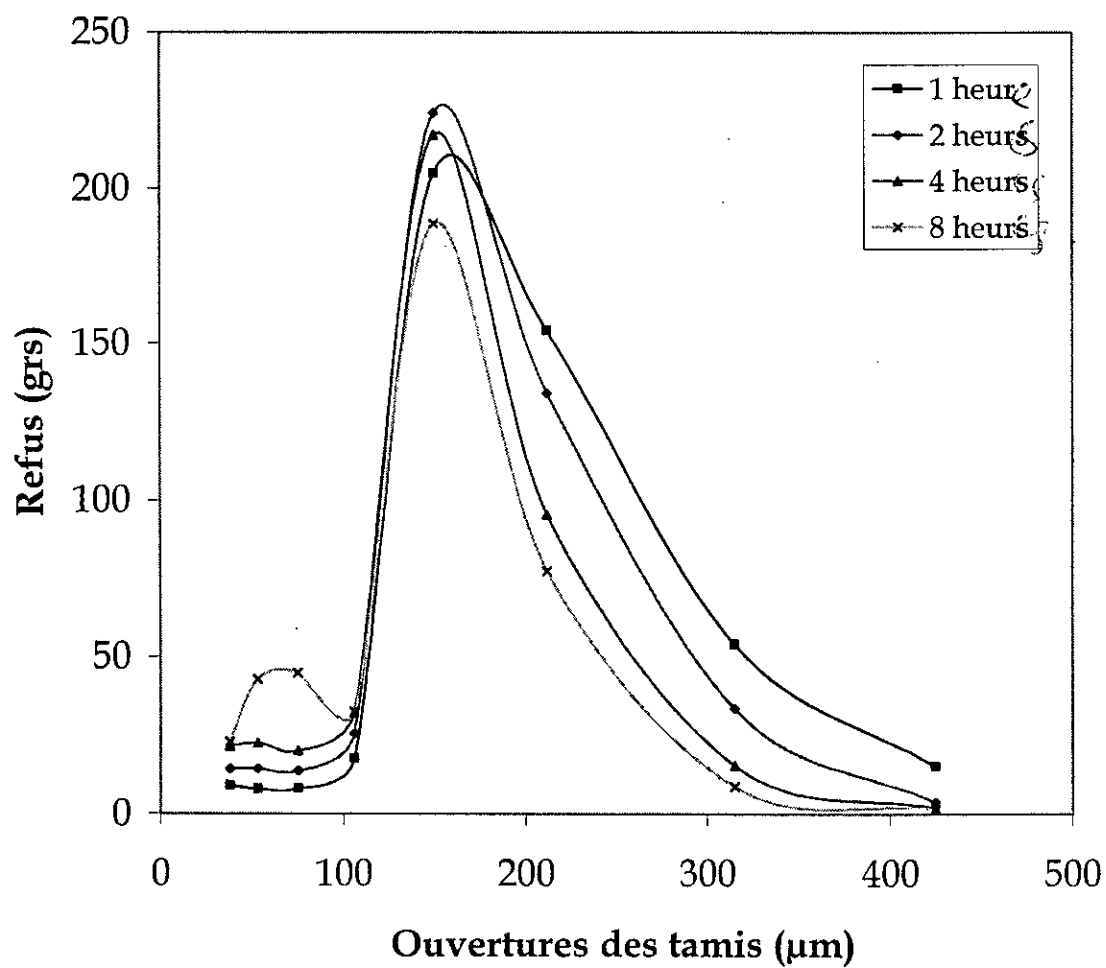


Figure 6.2 : Distribution de la taille après un broyage de 1, 2, 4 et 8 heures pour une masse broyée de 500 grs.

c) masse broyée 750 grs

- Diamètre moyen des copeaux initiaux $D_{mi} = 594.973 \mu\text{m}$;
- Vitesse de broyage $V = 2000 \text{ tr/min}$;
- 8 outils de broyage;
- distance (e) minimale.

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	58,2	7,76
315	359,4	47,92
212	171,6	22,88
150	57,2	7,62
106	19,5	2,6
75	14,1	1,88
53	12	1,6
38	13,7	1,82
bas fond	39,8	5,3

**Tableau 6.12 : Résultats de tamisage
après 1 h de broyage
($D_m = 259.289 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	20,1	2,73
315	319,2	43,38
212	177,6	24,13
150	63	8,56
106	28,4	3,86
75	23,3	3,17
53	17,3	2,35
38	17,1	2,32
bas fond	66,6	9,05

**Tableau 6.13 : Résultats de tamisage
après 2 h de broyage
($D_m = 251.663 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	7,8	1,07
315	264,1	36,27
212	147	20,19
150	71,3	9,79
106	36,7	5,04
75	31,7	4,35
53	22,4	3,08
38	22,1	3,03
bas fond	123,6	16,97

**Tableau 6.14 : Résultats de tamisage
après 4 h de broyage
($D_m = 222.069 \mu\text{m}$)**

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	4,6	0,61
315	197,4	26,32
212	138,2	18,42
150	82,8	11,04
106	45,8	6,1
75	42,1	5,61
53	41,6	5,54
38	38,6	5,14
bas fond	153,8	20,5

**Tableau 6.15 : Résultats de tamisage
après 8 h de broyage
($D_m = 188.605 \mu\text{m}$)**

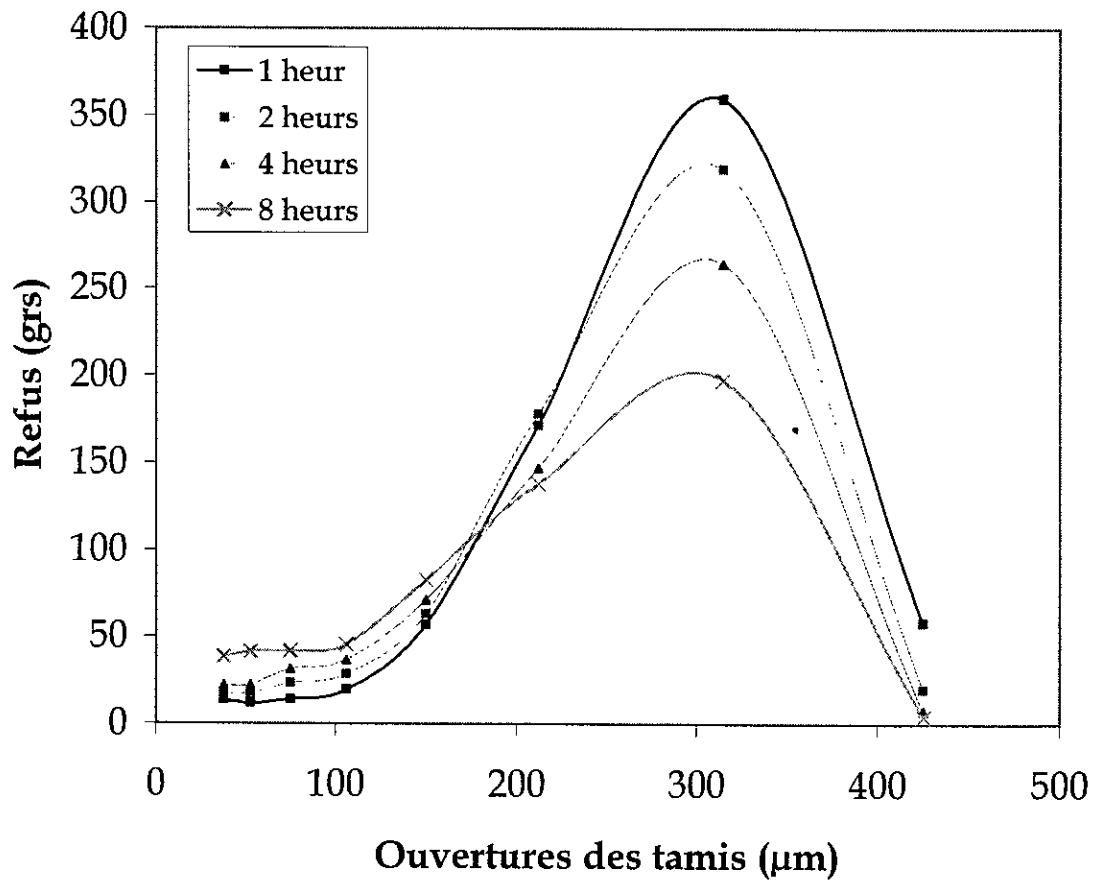


Figure 6.3 : Distribution de la taille après un broyage de 1, 2, 4 et 8 heures pour une masse broyée de 750 grs.

6.2.2 ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TAILLE INITIALE DES COPEAUX

6.2.2.1 Broyage de copeau à taille initiale grossière

- Masse initiale des copeaux 500 grs;
- Diamètre moyen des copeaux initiaux $D_{mi} = 1412,985 \mu\text{m}$;
- vitesse de broyage $V = 2000 \text{ trs/min}$;
- 8 outils de broyage;
- Distance (e) minimale;
- Temps de broyage 8 heures.

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	9,9	1,98
315	48,7	9,74
212	62,7	12,54
150	118,4	23,68
106	46,5	9,3
75	39,9	7,98
53	45,8	9,16
38	24,7	4,94
bas fond	98,9	19,78

Tableau 6.16 : Résultats de tamisage
après 8 h de broyage
($D_m = 142,935 \mu\text{m}$)

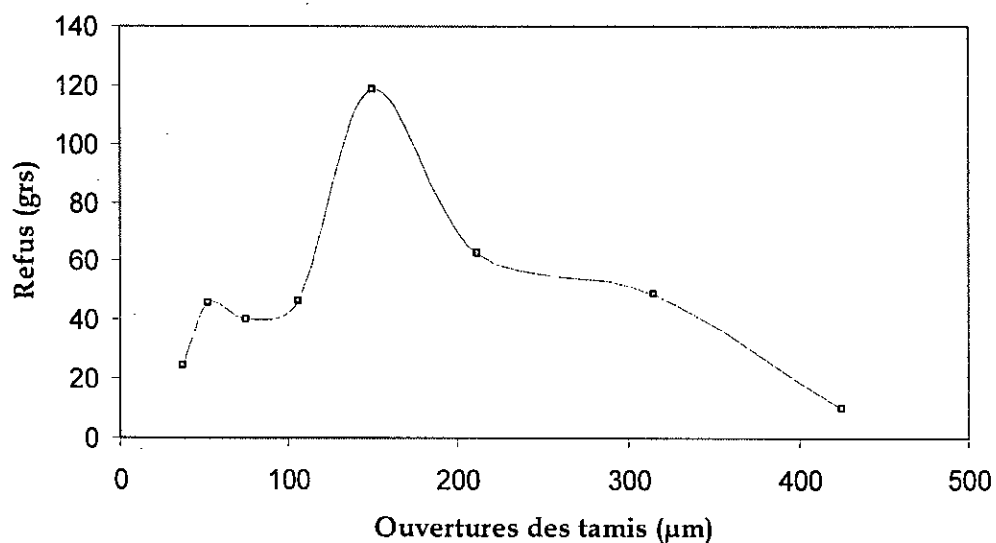


Figure 6.4 : Distribution de la taille après un broyage de 8 heures avec des copeaux initiaux grossiers.

6.2.2.2 Broyage de copeau à taille initiale fine

- Masse initiale des copeaux 500 grs;
- Diamètre moyen des copeaux initiaux $D_{mi} = 323.441 \mu\text{m}$;
- Vitesse de broyage $V = 2000 \text{ tr/min}$;
- 8 outils de broyage;
- Distance (e) minimale;
- Temps de broyage 8 heures.

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	0,5	0,1
315	3,5	0,7
212	14,4	2,88
150	256,3	51,26
106	98,2	19,64
75	33,9	6,78
53	16,6	3,32
38	17,8	3,56
bas fond	56,7	11,34

Tableau 6.17 : Résultats de tamisage
après 1 h de broyage
($D_m = 140.133 \mu\text{m}$)

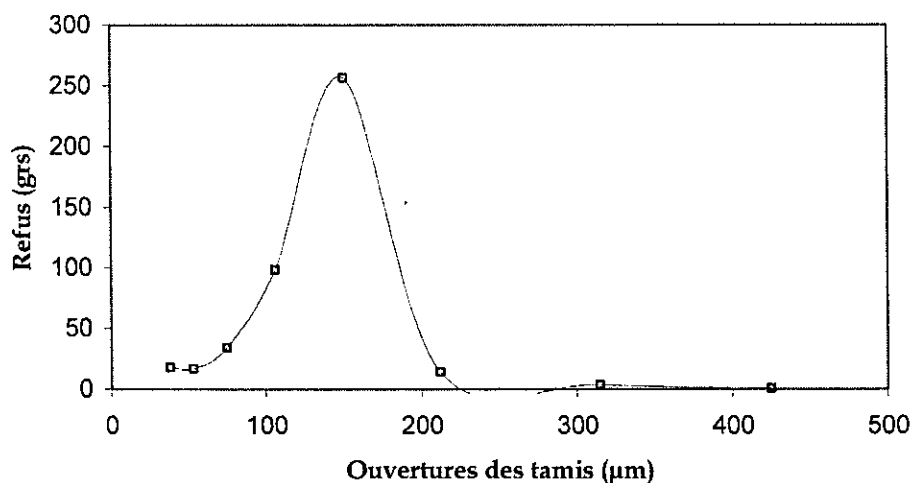


Figure 6.5 : Distribution de la taille après un broyage de 8 heures avec des copeaux fins.

6.2.3 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE DE BROUAGE

- Taille initiale des copeaux $D_{mi} = 594.97 \mu\text{m}$ (copeau moyen);
- Masse initiale des copeaux $m = 500 \text{ grs}$;
- Temps de broyage $t = 8 \text{ heures}$;
- 8 outils le broyage;
- La distance (e) minimale.

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
1250	4,6	0,92
850	23,7	4,74
600	101,3	20,29
425	138,4	27,72
315	170,9	34,23
212	31,1	6,22
150	12,5	2,5
106	5,7	1,14
75	3,2	0,64
53	1,7	0,34
bas fond	5	1

Tableau 6.18 : Résultats de tamisage
 $V_1 = 300 \text{ tr/min}$
 $(D_m = 500.717 \mu\text{m})$

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	21,4	4,28
315	129,4	25,88
212	201,8	40,36
150	85,3	17,06
106	19,2	3,84
75	12,1	2,42
53	5,8	1,16
38	5,6	1,12
bas fond	14,9	2,98

Tableau 6.19 : Résultats de tamisage
 $V_2 = 750 \text{ tr/min}$
 $(D_m = 241.906 \mu\text{m})$

tamis (μm)	Refus (gr)	(%)
425	1,7	3,46
300	8,9	1,81
212	77,4	15,77
150	188,6	38,42
106	32,8	6,68
75	45,1	9,18
53	43,1	8,78
38	23,1	4,7
bas fond	66,9	13,63

Tableau 6.20 : Résultats de tamisage

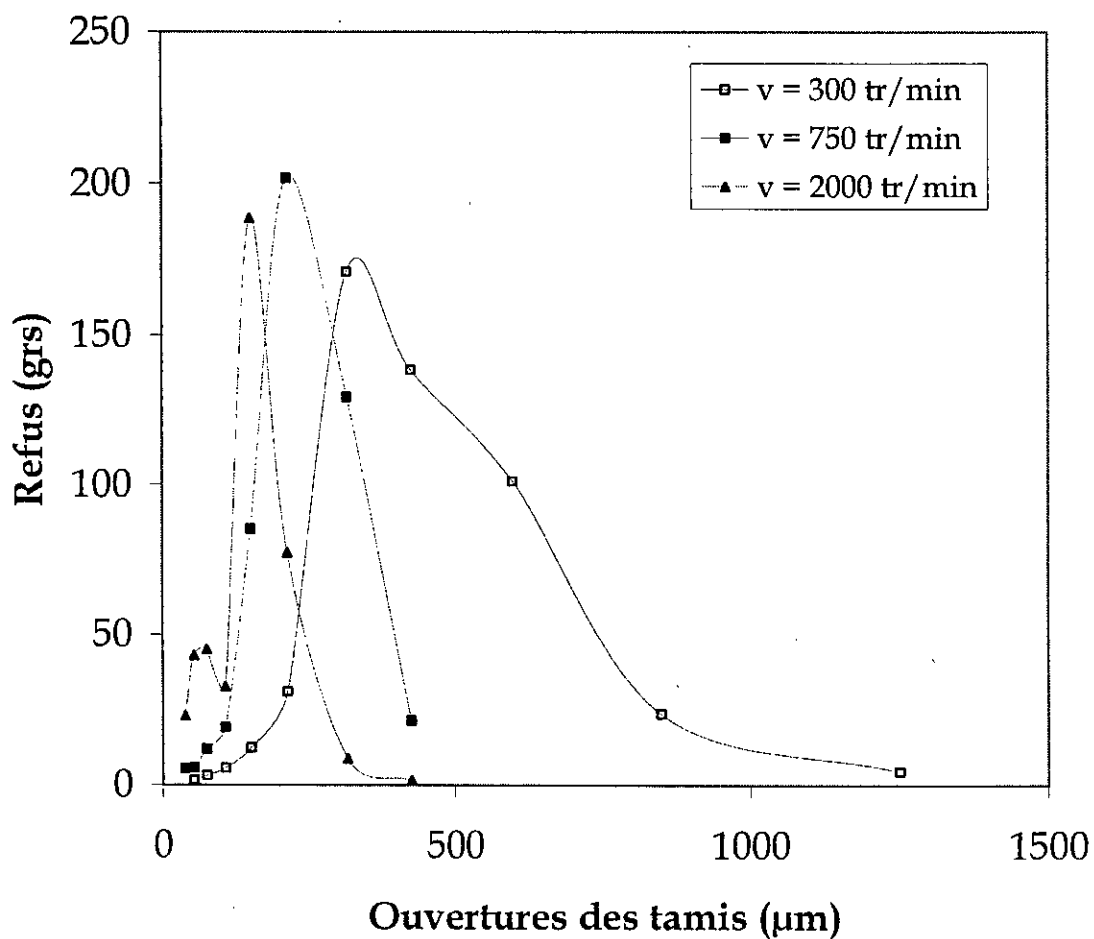
 $V_3 = 2000 \text{ tr/min}$ $(D_m = 146.41 \mu\text{m})$ 

Figure 6.6 : Distribution de la taille après un broyage de 8 heures avec des vitesses de 300, 750, 2000 tr/min.

6.3 INFLUENCE DES PARAMETRES DE BROYAGE

6.3.1 Influence du temps du broyage sur la taille des particules

a) Masse broyée 250 g

Temps de broyage (hrs)	Taille moyenne de la poudre (μm)
1	203.244
2	181.354
4	154.206
8	145.962

Tableau 6.21 : Influence du temps de broyage sur la taille des particules masse broyée 250 g.

b) masse broyée 500 g

Temps de broyage (hrs)	Taille moyenne de la poudre (μm)
1	205.745
2	191.970
4	164.403
8	146.510

Tableau 6.22 : Influence du temps de broyage sur la taille des particules masse broyée 500 g.

c) Masse broyée 750 g

Temps de broyage (hrs)	Taille moyenne de la poudre (μm)
1	259.289
2	251.663
4	222.069
8	188.605

Tableau 6.23 : Influence du temps de broyage sur la taille des particules masse broyée 750 g.

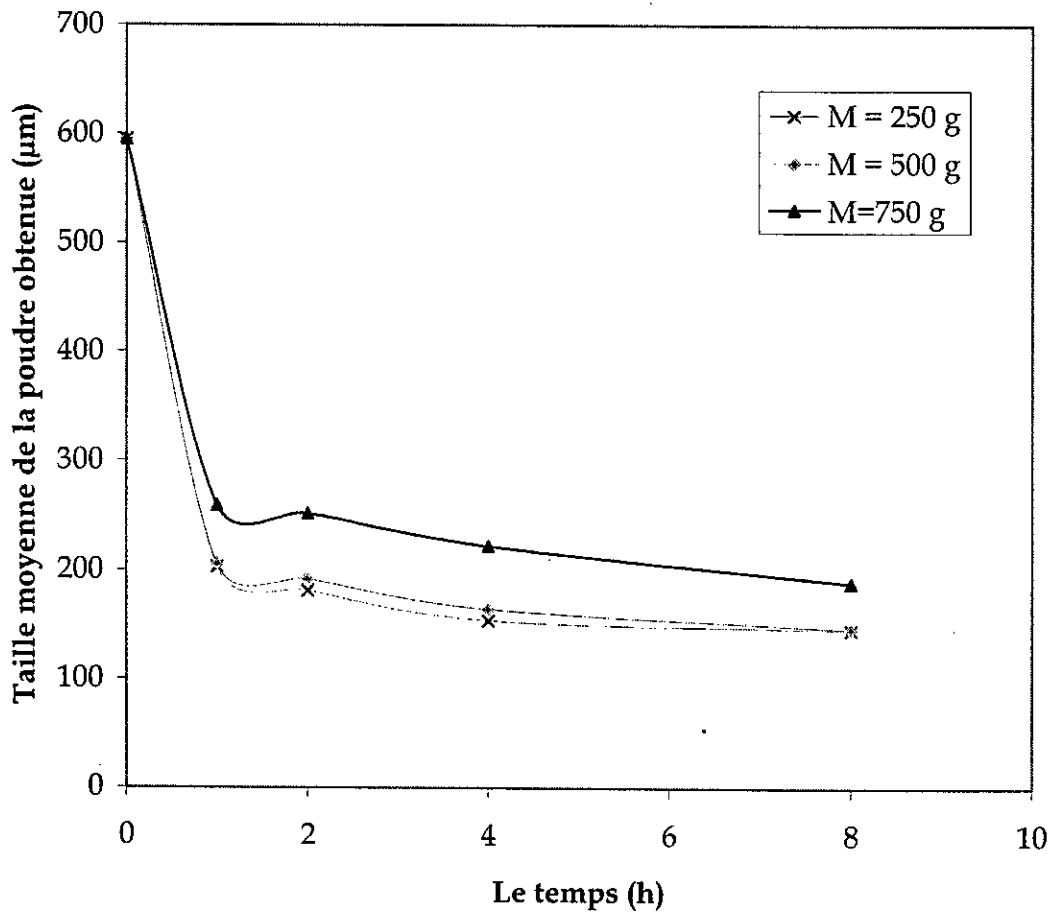


Figure 6.7 : Influence du temps sur la taille moyenne de la poudre pour différentes charges broyées 250, 500 et 750 grs.

6.3.2 Influence de la masse initiale des copeaux sur la taille des particules

Masse des copeaux initiaux (grs)	Diamètre moyen de la poudre obtenue après broyage (μm)			
	1 heure	2 heures	4 heures	8 heures
250	203,244	181,354	154,206	145,962
500	205,745	191,97	164,403	146,51
750	259,289	251,663	222,069	188,605

Tableau 6.24 : Influence de la masse initiale des copeaux sur la taille des particules.

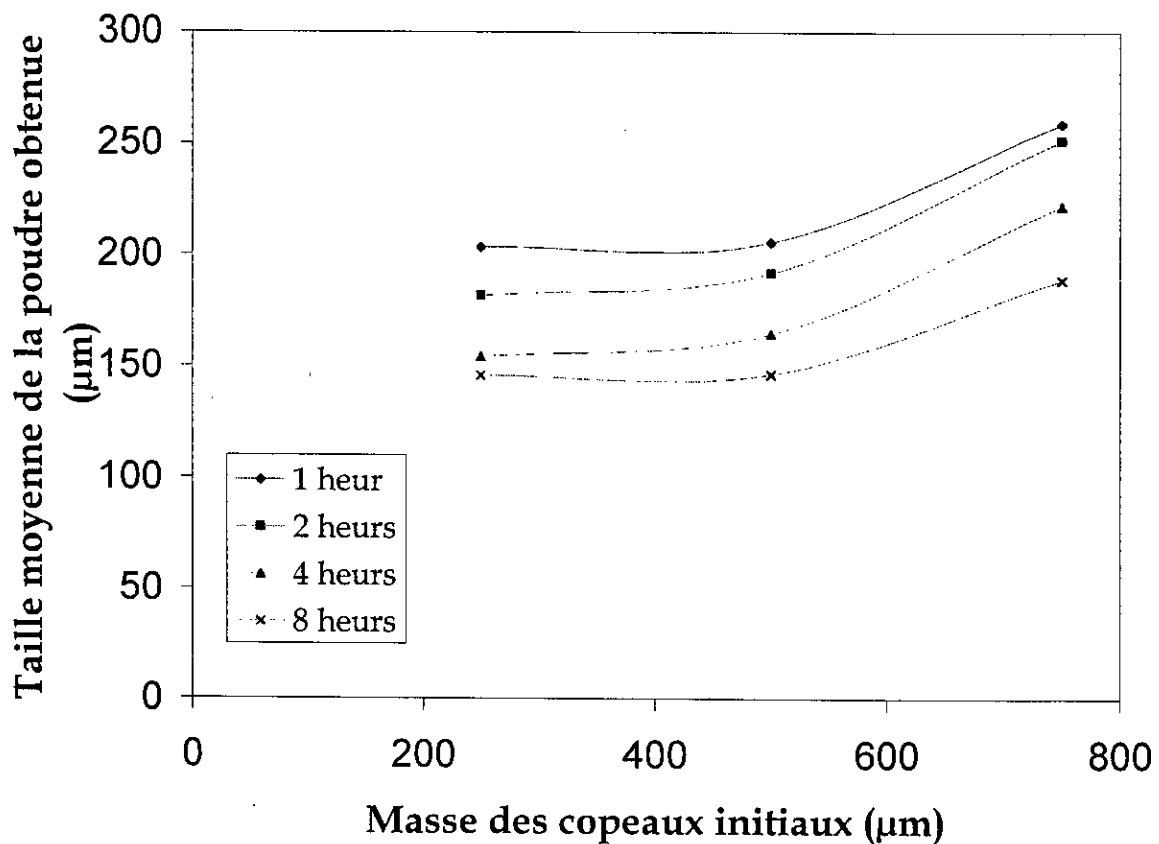


Figure 6.8 Influence de la masse initiale des copeaux sur la taille moyenne de la poudre pour différent temps de broyage 1, 2, 4, 8 heures.

6.3.3 Influence de la taille moyenne des copeaux sur la taille des particules

La taille initiale moyenne des copeaux (μm)	La taille moyenne de la poudre obtenue (μm)
323,441	140,133
594,973	146,510
1412,985	142,935

Tableau 6.25 : Influence de la taille initiale moyenne des copeaux sur la taille des particules de poudre.

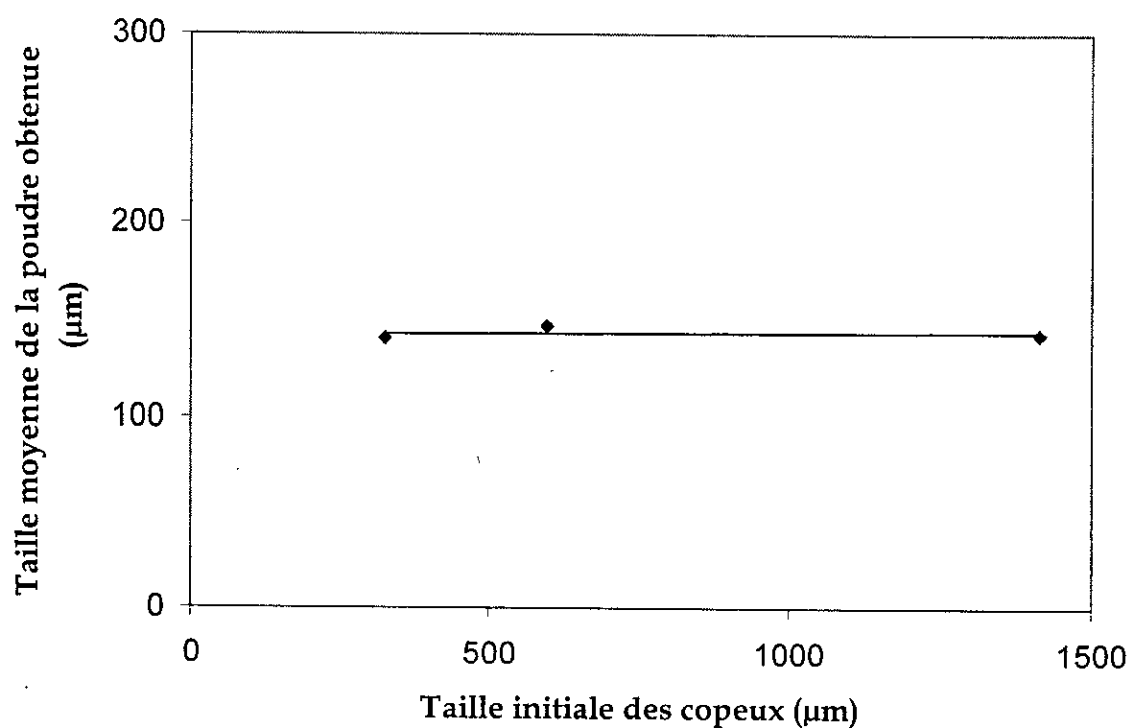


Figure 6.9 : Influence de la taille initiale moyenne des copeaux sur la taille des particules de poudre.

6.3.4 Influence de la vitesse de broyage sur la taille des particules

vitesse de broyage (tr/min)	Taille moyenne de la poudre obtenue (μm)
300	500.717
750	241.906
2000	146.51

Tableau 6.26 : Influence de la vitesse de broyage sur la taille des particules.

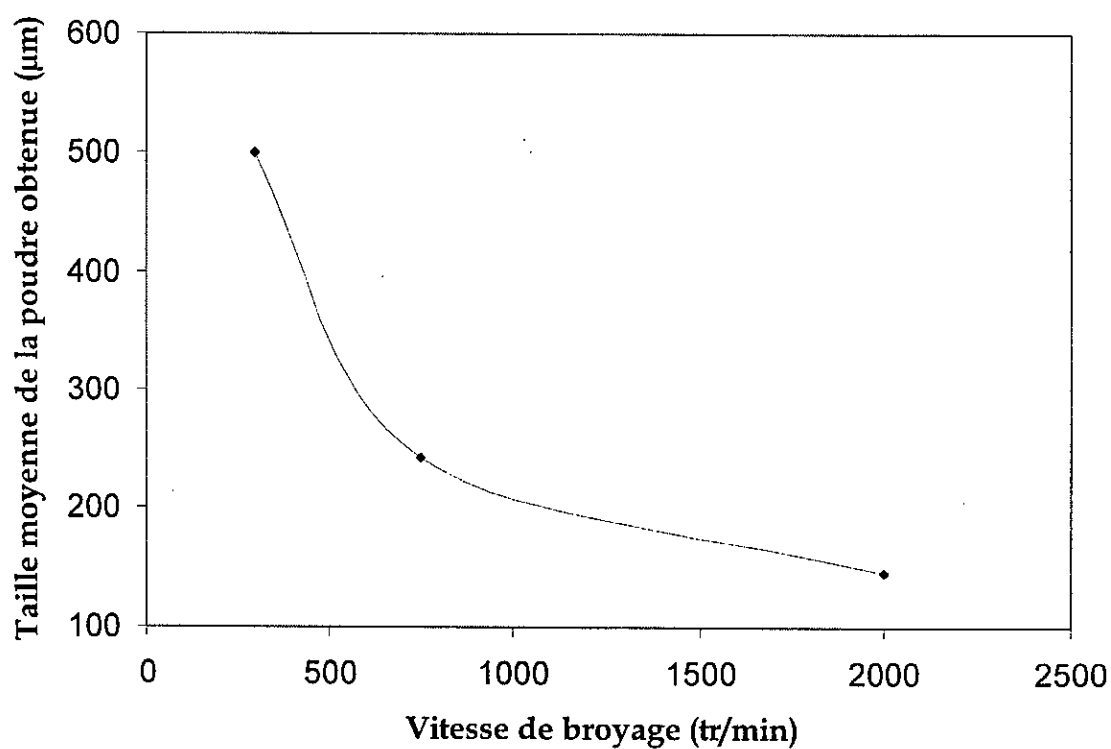


Figure 6.10 : Influence de la Vitesse de broyage sur la taille des particules de poudre.

6.4 EVOLUTION DE LA FRACTION FINE

La fraction fine est la masse de poudre produite retenue par l'assiette, dont la taille est inférieure à $38 \mu\text{m}$ (tamis le plus fin), l'évolution de cette fraction fine en fonction des quatre paramètres optimiser précédemment (temps de broyage, masse initiale des copeaux, taille initial des copeaux et vitesse de broyage) est illustrée sous forme de courbes suivante :

6.4.a) Par rapport au temps de broyage

- 500g de masse initial du copeau;
- Diamètre du copeau initial moyen $D_m = 594.97 \mu\text{m}$;
- Vitesse de broyage $v = 2000 \text{ tr/min}$.

Temps de broyage (h)	1	2	4	8
Fraction fine (grs)	23.2	33.4	59.1	66.9

Tableau 6.27 : Evolution de la fraction fine retenue en fonction de temps de broyage.

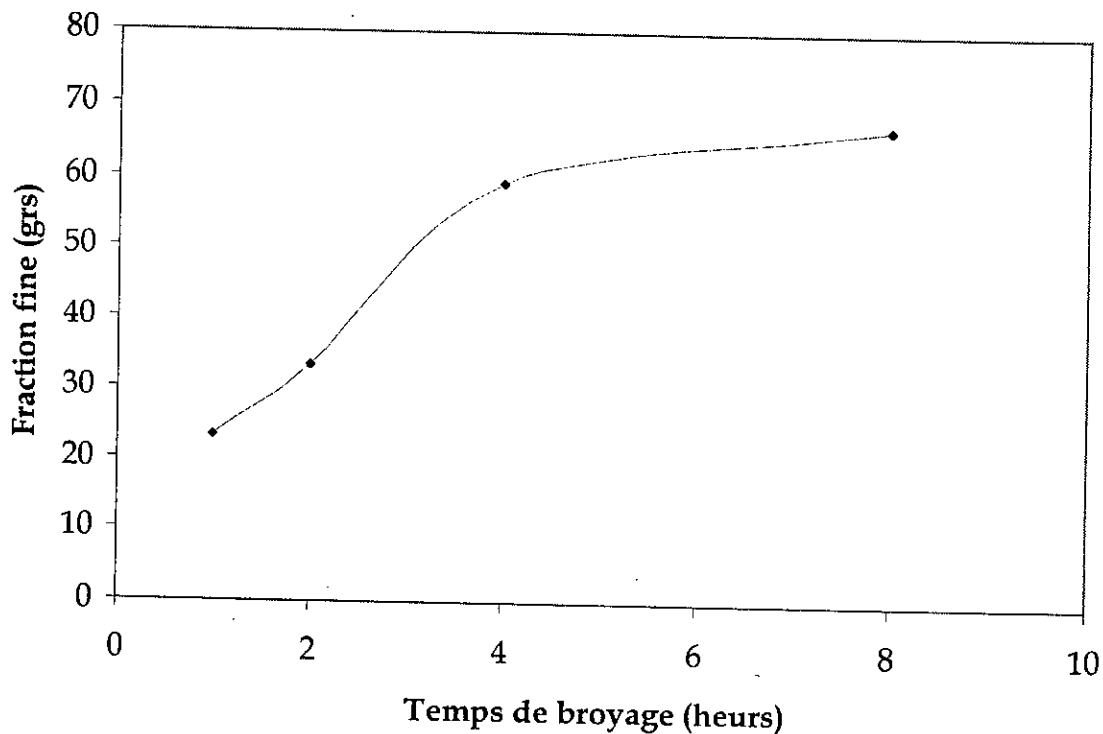


Figure 6.11 : Evolution de la fraction fine retenue en fonction de temps de broyage.

6.4.b) Par rapport à la masse initiale des copeaux

- 8 heures de broyage;
- Diamètre du copeaux initial moyen $D_m = 594.97 \mu\text{m}$;
- Vitesse de broyage $V = 2000 \text{ tr/min}$.

Masse initiale (grs)	250	500	750
Fraction fine (grs)	10.1	66.9	153.8

Tableau 6.28 : Evolution de la fraction fine retenue en fonction de la masse initiale du copeau.

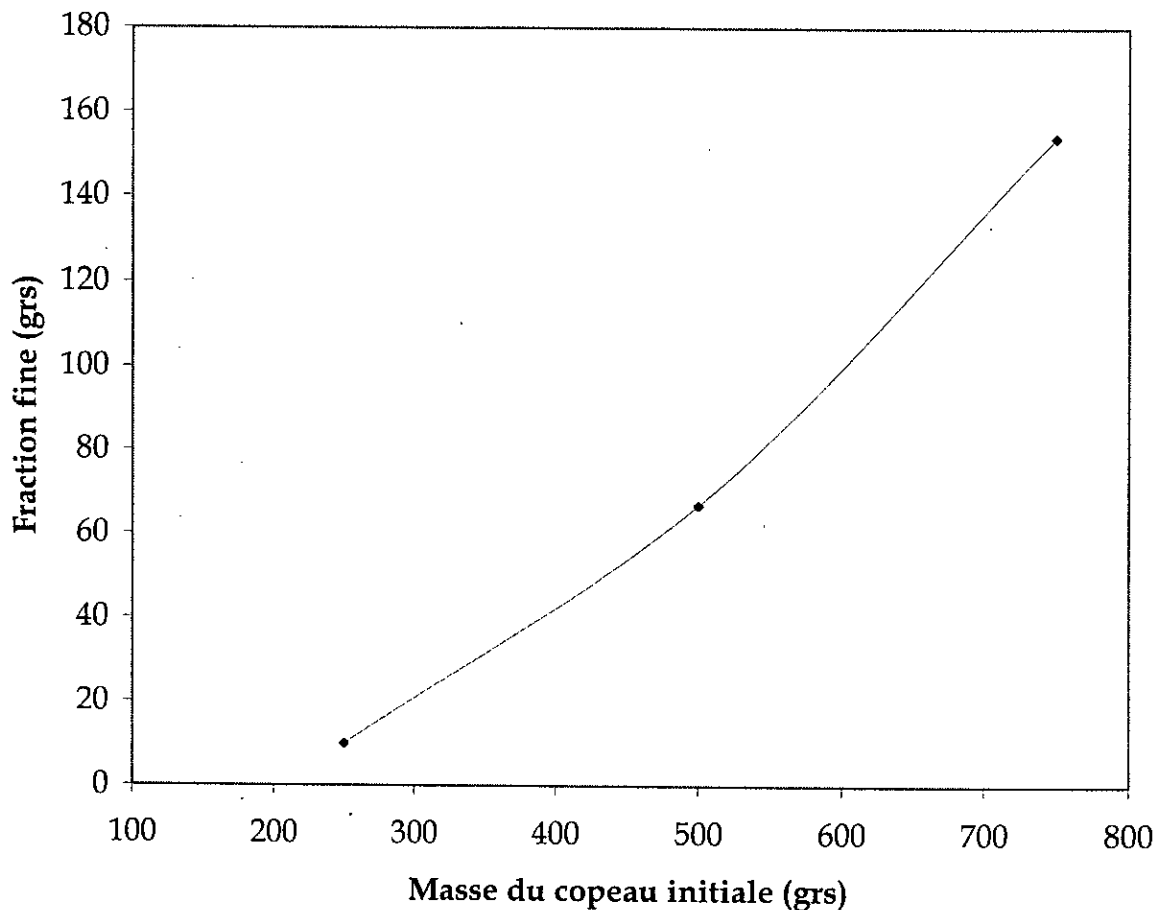


Figure 6.12 : Evolution de la fraction fine retenue en fonction de la masse initiale du copeau.

6.4.c) Par rapport à la taille initiale des copeaux

- 8 heures de broyage;
- Masse du copeau initial $M = 500$ g;
- Vitesse de broyage $V = 2000$ tr/min.

Taille initiale des copeaux (μm)	318.122	594.973	1412.985
Fraction fine (grs)	56.9	66.9	98.9

Tableau 6.29 : Evolution de la fraction fine retenue en fonction de la taille initiale des copeaux.

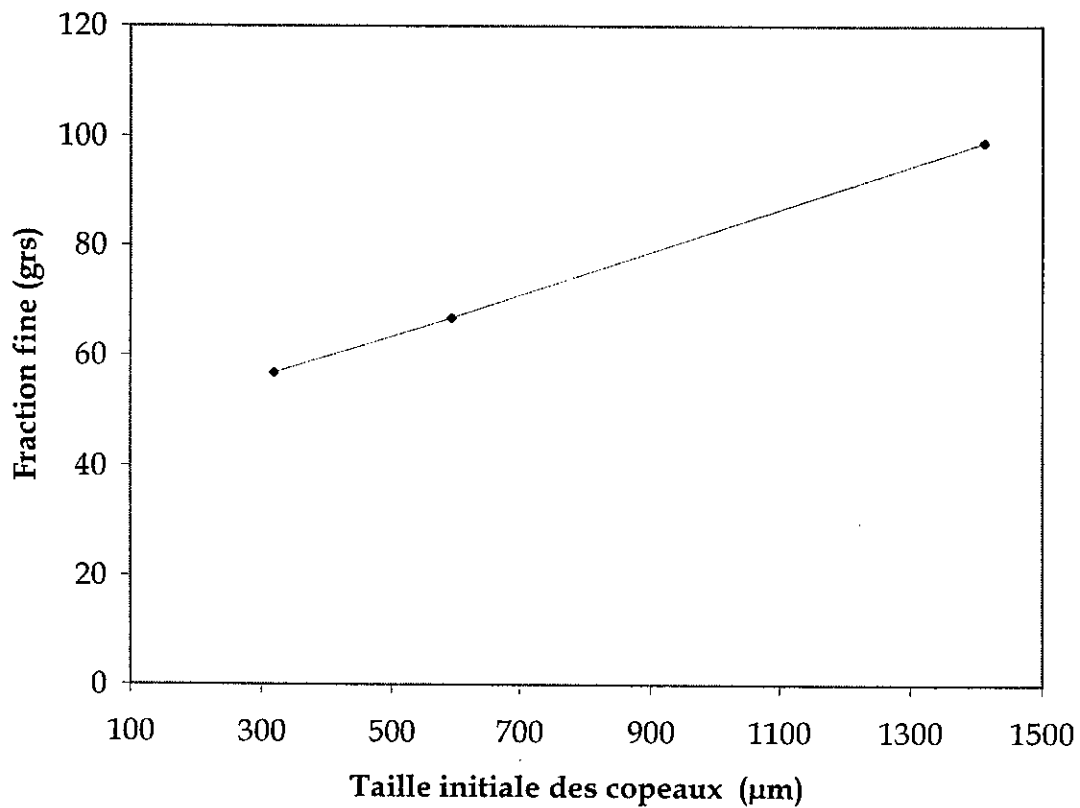


Figure 6.13 : Evolution de la fraction fine retenue en fonction de la taille initiale des copeaux.

6.4.d) Par rapport à la vitesse de broyage

- 8 heures de broyage;
- Masse du copeau initial $M = 500$ g;
- Diamètre initial des copeaux moyens $D_m = 594.97 \mu\text{m}$.

vitesse de broyage (tr/min)	300	750	2000
Fraction fine (grs)	5	14.9	66.9

Tableau 6.30 : Evolution de la fraction fine retenue en fonction de la vitesse de broyage.

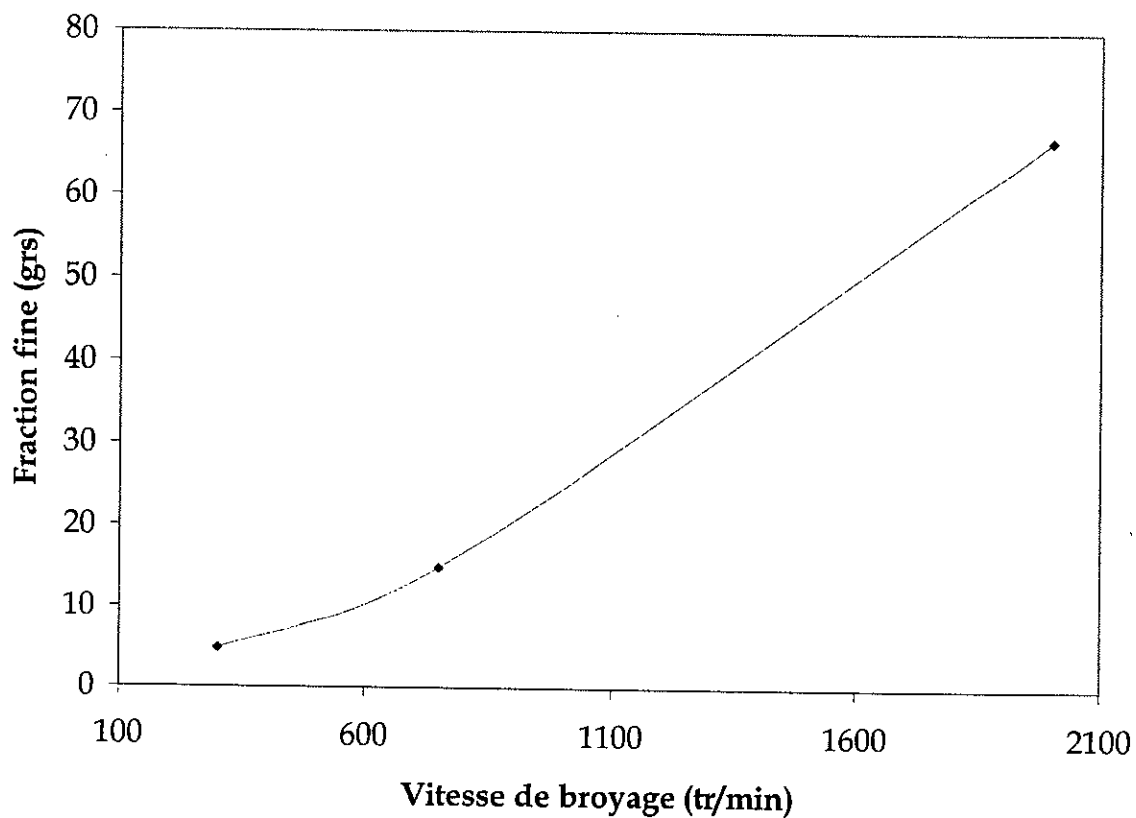


Figure 6.14 : Evolution de la fraction fine retenue en fonction de la vitesse de broyage.

6.5 COURBES DE COMPARAISON ENTRE LE BROYEUR À LAMES ET LE BROYEUR À BOULETS

6.5.a Influence du temps de broyage

Broyeur à lames Masse initiale des copeaux 500g; Vitesse de broyage $V=2000$ tr/min; Taille initiale des copeaux moyens $D= 594.97 \mu\text{m}$.				
Temps de broyage (h)	1	2	4	8
Diamètre moyen De la poudre obtenue (μm)	205.745	191.170	164.403	146.510

Tableau 6.31 : Influence du temps de broyage sur la taille des particules. (Broyeur à lames).

Broyeur à boulets Masse initiale des copeaux 500g Charge broyante 2731.7 g Taille initiale des copeaux moyens $D= 456.7 \mu\text{m}$ Gros boulets				
Temps de broyage (h)	2	4	8	16
Diamètre moyen De la poudre obtenue (μm)	388.9	343.8	322.9	308.1

Tableau 6.32 : Influence du temps de broyage sur la taille des particules (Broyeur à boulets) [22].

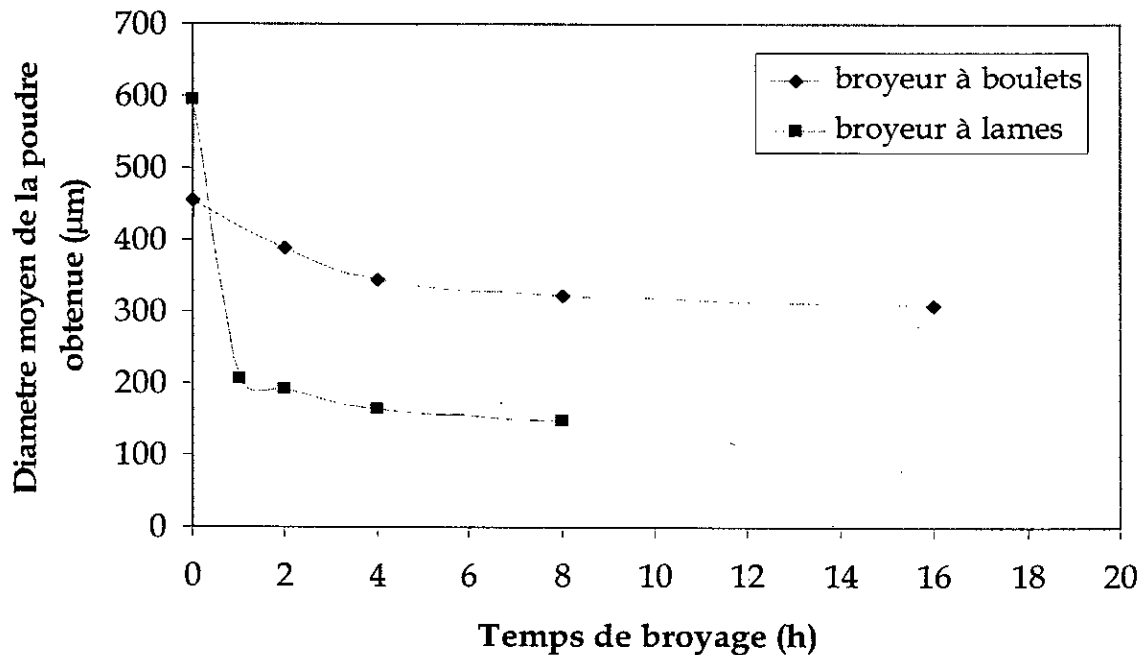


Figure 6.15 : Comparaison entre le broyeur à lames et le broyeur à boulets dans l'influence du temps de broyage.

6.5.b Influence de la masse initiale des copeaux

Broyeur à lames 8 heures de broyage; Taille initiale des copeaux moyenne $D_m = 594.973 \mu\text{m}$ Vitesse de broyage $V = 2000 \text{ tr/min}$			
Masse initiale des copeaux (grs)	250	500	750
Taille moyenne de la poudre obtenue (μm)	145,962	146,510	188,605

Tableau 6.33 : Influence de la masse initiale des copeaux sur la taille des particules (Broyeur à lames).

Broyeur à boulets 16 heures de broyage; Taille initiale des copeaux moyenne $D_m = 620 \mu\text{m}$ masse broyante $M = 1368 \text{ grs}$			
Masse initiale des copeaux (grs)	250	500	750
Taille moyenne de la poudre obtenue (μm)	220,010	260,020	302,47

Tableau 6.34 : Influence de la masse initiale des copeaux sur la taille des particules (broyeur à boulets) [23].

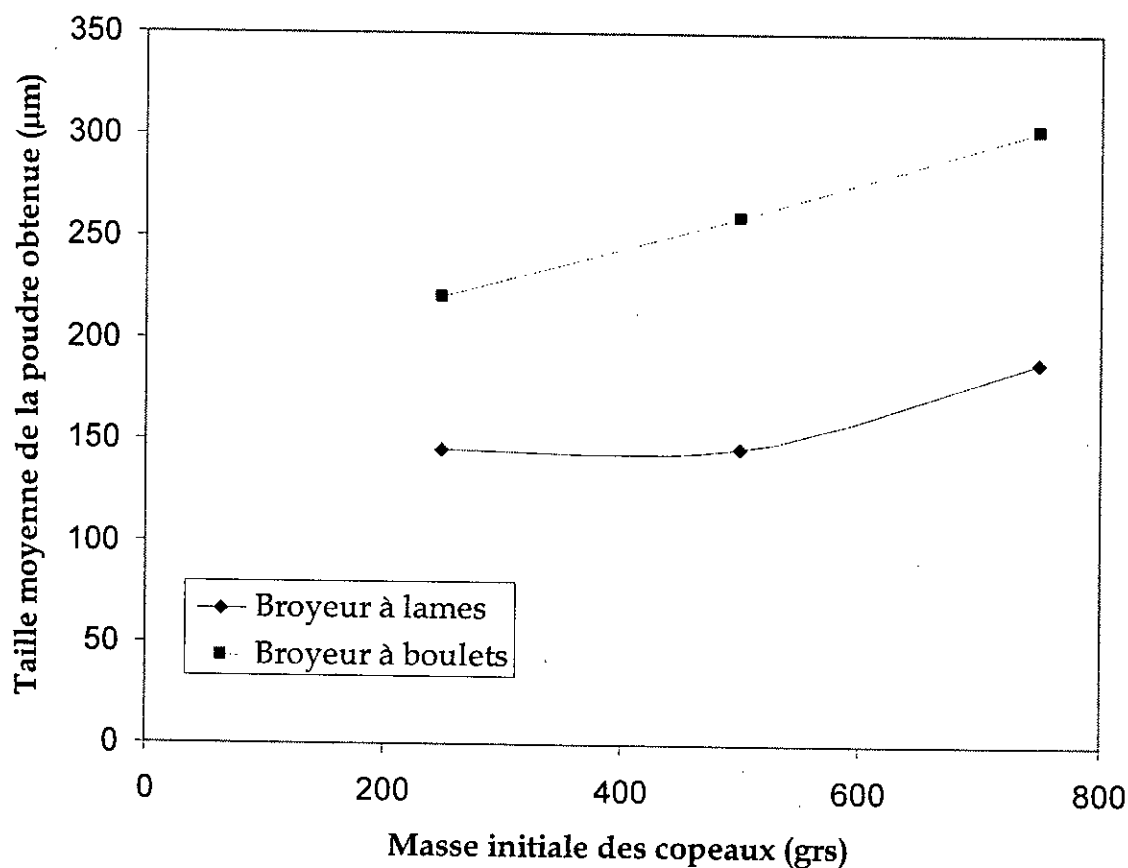


Figure 6.16 : Comparaison entre le broyeur à lames et le broyeur à boulets dans l'influence de la masse initiale des copeaux.

CHAPITRE 7

INTERPRETATION DES RESULTATS

7.1 INTRODUCTION

Le présent travail consiste en la conception et la réalisation d'un broyeur à lames ainsi que l'optimisation de ses paramètres. Parmi les paramètres étudiés on cite : le temps de broyage, la masse initiale des copeaux, la taille initiale des copeaux et la vitesse de broyage. Dans cette étude, nous avons produit par broyage mécanique une poudre de bronze à partir des copeaux d'usinage. Le produit obtenu est de très bonne qualité particulièrement en terme de finesse de la poudre et des formes sphériques des particules, qui sont très recherchées pour des applications industrielles diverses.

7.2 INFLUENCE DU TEMPS DE BROYAGE

L'objectif d'une opération de broyage est de diminuer la taille des particules à un degré optimal et idéal. La variation du paramètre temps, nous permet de mettre en évidence l'action des phénomènes autres que ceux qui mènent à la fragmentation et la désintégration des particules de poudre (phénomène d'agglomération et de soudure à froid).

Les figures 6.1, 6.2, 6.3 et 6.4 montrent la distribution des tailles à travers la masse broyée de la poudre, pour respectivement 1, 2, 4 et 8 heures de broyage.

- A partir de ces figures on constate que la distribution de taille se répand sous la forme d'une cloche. Celles-ci commencent par un minimum puis augmentent pour atteindre un maximum et diminuer jusqu'au minimum une nouvelle fois. Cette distribution montre que dans un amas de poudre, les fractions fines et grossières sont équivalentes, tandis que la majorité des particules ont une taille moyenne.
- Toutes les courbes se croisent en un même point situé à gauche du maximum. A gauche de ce point, la fraction de poudre retenue dans un tamis de granulométrie inférieur à la taille moyenne de la poudre produite augmente suivant l'ordre croissant du temps de broyage. Par contre à droite de ce point l'ordre se trouve inversé, car la fraction de poudre retenue par les tamis correspondants diminue en fonction du temps. Par ailleurs il faut noter la présence d'un petit pique qui devient grand avec le temps de broyage. Ce pique se forme au niveau du tamis d'ouverture 53 μm comme le montre la figure 6.1
- A partir de la figure 6.7, on remarque que l'influence du temps de broyage sur la taille de la poudre produite est une courbe décroissante. Cette dernière a la même allure pour les trois masses initiales de copeau (250, 500 et 750grs). On constate que cette courbe est divisée en deux parties. La première partie

montre la diminution très rapide de la taille pour des temps de broyage compris entre 0 et 1 heure. Cette diminution est de l'ordre de 400 microns. Dans cet intervalle, la portion de courbe est une droite qui a une très grande pente. Par contre dans la deuxième partie comprise entre 1hr et 8 hr, où le temps de broyage est très long, la taille moyenne de la poudre obtenue diminue lentement. Durant toute cette période la taille ne diminue que de 50 μm environ. Ce qui est illustré par une faible pente de la courbe.

De ces constatations, on peut dire que les petits pics qui apparaissent à gauche des courbes de tamisage, illustrent une fraction retenue plus fine que son ouverture (53 μm). Cela est dû à plusieurs hypothèses. La plus probable est que les fines particules sous forme d'écaillés s'agglomèrent avec les grosses particules à cause de leur haute rugosité. Par conséquent la taille moyenne des agglomérés ainsi formés augmente ce qui explique leur rétention par ce tamis.

Le premier mécanisme de broyage qui opère dans ce broyeur est le cisaillement. Ainsi, à grande vitesse les copeaux sont cisailés par les outils fixes et les outils mobiles, car au début du broyage, la taille des copeaux est plus grande que l'écartement entre les outils. Ce cisaillement des copeaux peut se produire individuellement ou collectivement. Ainsi, il est facile d'imaginer qu'un paquet de particules dans le nuage de copeaux soit pris en cisaillement par les outils, ce qui augmente la probabilité et l'efficacité du broyage.

Dans la deuxième partie de la courbe, la taille de la poudre s'affine lentement dans le temps. Ceci par le fait que le mécanisme de cisaillement n'est plus dominant. Ici d'autres mécanismes de broyage plus dominant prennent le relais. Parmi ces mécanismes on cite la percussion et l'attrition. Durant le premier mécanisme cité, des copeaux sont percutés à grande vitesse plusieurs fois sur les outils fixes et la paroi de la chambre. Ce travail mécanique permet l'écrouissage des copeaux, d'où la fragilisation, et la croissance des craques à l'intérieur des copeaux. Par voie de conséquence, il en résulte la fragmentation des particules en plusieurs fines particules. Ce résultat est confirmé par la théorie de Griffith de la fracture fragile expliquée dans la partie bibliographique (eq 2.1)

L'autre mécanisme important dans cette partie est l'effet de l'attrition. Cet effet se caractérise par la formation de fines particules dû au frottement et l'usure des copeaux les uns contre les autres et avec la paroi de la chambre de broyage. Cela provoque la diminution de la taille des particules de poudre dans le temps. Dans ces conditions de temps prolongés, les copeaux se broient jusqu'à atteindre une certaine taille minimale qui reste constante en augmentant le temps. Cela est confirmé par des résultats antérieurs rapportés dans le chapitre 2 de la revue bibliographique. Dans ce chapitre parlant du broyage ultra-fin des particules de poudre, il est rapporté que "Généralement, quant la pulvérisation agit pendant un temps excessivement long, la contrainte nécessaire pour la fracture des particules augmente, pendant que les contraintes locales requises pour la fracture diminuent. [10]". Les courbes de la figure

6.7 de notre travail sont semblables à la courbe de la figure 2.4 de la partie bibliographique, d'où la justesse de nos résultats.

De la figure 6.7 nous avons calculé la pente moyenne des droites tangente aux courbes aux points d'inflexion. Ces droites ont une pente $x = \tan(\alpha) = -36$. C'est un rapport inversement proportionnel entre la taille moyenne de la poudre et le temps de broyage. D'où on peut écrire :

$$D_m \propto t^{-36.42}$$

7.3 INFLUENCE DE LA MASSE INITIALE DES COPEAUX

Lors du broyage des copeaux moyens, on a utilisé trois charges initiales qui sont : 250, 500 et 750 grammes. Ceci dans le but de mettre en évidence l'influence de la masse initiale des copeaux sur la taille moyenne de la poudre obtenue.

Les résultats de cette expérience sont montrés dans la figure 6.8. Cette figure montre l'évolution de la taille moyenne de la poudre obtenue en fonction de la masse initiale des copeaux pour 1, 2, 4 et 8 heures de broyage. On constate que toutes les courbes ont la même allure. La taille moyenne de la poudre obtenue évolue dans le sens croissant de la masse initiale des copeaux.

Une éventuelle explication de ce résultat réside dans le fait qu'en broyant une petite masse de copeaux, le nombre de copeaux à l'intérieur du broyeur est petit. D'où les copeaux tournent librement dans le broyeur sans contact corporel entre eux. La charge de poudre se trouve bien répartie dans la chambre, et l'effet de la percussion n'est pas gêné par l'effet de freinage que la poudre exerce sur la roue de broyage. Donc l'effet de la percussion est grand. En augmentant la masse initiale des copeaux, le nombre de particules des copeaux à l'intérieur du broyeur augmente, d'où les copeaux ne tournent pas librement dans le broyeur par effet d'encombrement des particules. Par conséquent, la roue de broyage ne tourne pas facilement à cause de l'inertie que la poudre exerce sur elle. D'où un grand frottement interne engendrant le chauffage des particules, avec une diminution de l'effet de la percussion. Cela est confirmé dans la partie bibliographique lors de l'analyse du taux de traitement dans un broyeur à vibration au point N°7 page 34.

De ce qui a été dit on aboutit au résultat suivant : en augmentant la masse initiale des copeaux, l'encombrement à l'intérieur du broyeur augmente, d'où l'énergie de la percussion diminue et les chocs provoquant la fragmentation de la poudre deviennent moins énergiques, ce qui mène à l'augmentation des particules de poudre obtenue.

A partir des courbes de la figure 6.8, on a calculé la pente moyenne des droites tangentes aux points d'inflexion, ce qui donne $y = \tan(\beta) = 0,12$. Ce résultat montre

un rapport proportionnel entre la taille moyenne de la poudre obtenue et la masse initiale des copeaux broyés. Ainsi, on peut écrire :

$$D_m \propto M_c^{0.12}$$

7.4 INFLUENCE DE LA TAILLE INITIALE DES COPEAUX

Lors du broyage d'une masse de 500 g de copeaux pendant 8 heures à vitesse maximale, on a utilisé trois gammes de copeaux dont les tailles sont : 318, 595 et 1413 μm . Le but de cette variation est de monter l'effet de la taille initiale des copeaux sur la taille moyenne de la poudre obtenue. De la figure 6.9 on remarque que la courbe d'influence est une droite parallèle à l'axe des abscisses. Par conséquent la taille moyenne de la poudre obtenue ne varie pas beaucoup en variant la taille initiale des copeaux. Le peu de variation observé qui est de l'ordre de quelques microns (5 μm), ne peut être considéré comme étant le résultat de l'influence de cette variable de broyage, car très proche de l'erreur de mesure.

Cela peut être expliqué par l'effet du cisaillement, qui est le premier mécanisme de broyage dominant qui opère dans notre broyeur. Ainsi, on a vu dans l'influence du temps que la taille moyenne de la poudre obtenue diminue rapidement dans l'intervalle de temps [0hr- 1hr]. Donc quelque soit la taille des copeaux fins, moyens, ou grossiers, ils vont être égalisés par cisaillement à la même taille, qui correspond l'écartement entre les outils fixes et mobiles. Par conséquent, au delà d'une heure de broyage toutes les gammes de copeaux auront la même taille et subiront les mêmes conditions de broyage conduisant presque à la même taille moyenne enregistrée.

Comme conséquence directe de ces résultats, la taille initiale des copeaux n'a pas d'influence marquante sur la taille moyenne de la poudre obtenue.

Ceci est illustré par une droite horizontale dans la figure 6.9 avec une pente égale à 0. Cela veut dire que la taille moyenne de la poudre obtenue est indépendante de la taille initiale des copeaux.

7.5 INFLUENCE DE LA VITESSE DE BROUYAGE

Pour mettre en évidence l'influence de la vitesse de broyage sur la taille moyenne de la poudre obtenue, nous avons utilisé trois vitesses croissantes de valeurs 300, 750, et 2000 tr/min. Le temps de broyage est maintenu à une valeur maximale de 8 heures. La taille initiale des copeaux utilisés est la taille moyenne qui est de (595 μm), tandis que la masse initiale des copeaux utilisés est de 500g.

A partir des résultats obtenus, et en se référant à la figure 6.10, on remarque que la taille moyenne des particules de poudre obtenues diminue en augmentant la vitesse de broyage.

Cette augmentation de taille peut s'expliquer par :

- En diminuant la vitesse de broyage, la roue porte-outils tourne lentement. Par conséquent l'énergie de percussion diminue, d'où la fragmentation des particules par percussion diminue. Dans ces conditions l'énergie nécessaire pour la croissance des cracks à l'intérieur des copeaux n'est pas suffisante. Par contre en augmentant la vitesse de broyage, la roue porte-outils tourne de plus en plus vite, d'où l'énergie de percussion augmente, conduisant à une bonne fragmentation des copeaux par percussion. Dans ces conditions, l'énergie nécessaire pour l'initiation des cracks, leurs croissances et la rupture ultérieure est atteinte.

De la figure (6.10), nous avons calculé la pente de la droite tangente au point d'inflexion, donnant une valeur de - 0,18. Cela donne un rapport inversement proportionnel entre la vitesse de broyage et la taille moyenne de la poudre obtenue.

$$D_m \propto V^{-0.18}$$

7.6 INTERPRETATION DE L'EVOLUTION DE LA FRACTION FINE

Le but de cette étude est d'optimiser les paramètres du broyeur réalisé. Pour avoir une taille moyenne de particule de poudre plus fine possible, on a étudié l'évolution de la fraction fine, qui est la quantité de poudre retenue par l'assiette dont la taille est inférieure au plus fin tamis (38 μm). Cette fraction fine est définie comme le rendement de notre broyeur. C'est à dire sa capacité à produire la plus fine taille de poudre dans des conditions données.

Pour cela nous avons étudié l'évolution de la fraction fine en fonction des quatre variables de broyage ; c'est dire le temps de broyage, la masse initiale des copeaux, la taille initiale des copeaux et la vitesse de broyage.

7.6.a Par rapport au temps de broyage

A partir des résultats montrés dans le chapitre 6; et en se référant à la figure 6.11, on remarque que la fraction fine augmente dans le sens croissant du temps. La fraction fine est le résultat de deux mécanismes de broyage: la percussion et l'attrition. En augmentant le temps, le nombre de fois que les copeaux sont percutés contre les outils fixes et la paroi du broyeur augmente. D'où l'augmentation de la masse de la fraction fine due à la percussion. Simultanément, les particules de copeaux se frottent entre elles, ce qui permet la production de poudre très fine en forme d'écaille par effet de l'attrition. En augmentant le temps de broyage, le temps de contact des particules des copeaux augmente, d'où l'augmentation de la masse de la fraction fine.

7.6.b Par rapport à la masse initiale des copeaux

De la figure 6.12, on remarque que la masse de la fraction fine augmente en augmentant la masse initiale des copeaux. Cela est évident car en augmentant la masse initiale des copeaux le nombre de copeaux augmente, par conséquent, le phénomène de l'attrition est plus favorisé car le frottement entre les particules est grand, et le nombre de particules percutés contre les lames fixes et la paroi du broyeur est grand aussi, ce qui conduit à l'augmentation de la masse de la fraction fine.

7.6.c Par rapport à la taille initiale des copeaux

La figure 6.13 montre que la courbe d'évolution de la fraction fine est une droite de pente positive. Ce qui veut dire que la masse de la fraction fine augmente avec l'augmentation de la taille initiale des copeaux. Cette constatation peut être expliquée par le fait qu'un copeau grossier a une grande masse. Donc à une grande vitesse de broyage (2000 tr/min), l'écrasement et la fragilisation des copeaux sont très importants facilitant ainsi la fragmentation de ces derniers et donc l'augmentation de la fraction fine.

7.6.d Par rapport à la vitesse de broyage

D'après la figure 6.14, la courbe d'influence a une allure de puissance. Ici la masse de la fraction fine augmente d'une façon considérable en fonction de la vitesse de broyage. Comme expliqué antérieurement, on a vu que la force de percussion est proportionnelle à la vitesse de rotation, d'où l'augmentation de la fraction fine.

7.7 COMPARAISON ENTRE LE BROEUR A LAMES ET LE BROEUR A BOULETS

Pour mieux évaluer l'efficacité du broyeur à lames, nous avons effectué une comparaison entre le broyeur à boulets et notre broyeur à lames. Pour cela on a sélectionné deux variables de broyage : le temps de broyage et la masse initiale des copeaux. Pour cela on a pris les résultats des travaux qui ont été effectués sur le broyeur à boulets en comparaison aux nôtres, comme indiqué sous forme de courbes dans la figure 6.15 pour l'influence du temps de broyage et 6.16 pour l'influence de la masse initiale des copeaux. De ces deux figures on constate :

- A partir de la figure 6.15, on remarque que la courbe d'influence relative au broyeur à lames est en dessous de celle du broyeur à boulets. De même, on remarque aussi qu'après 1 heure de broyage dans le broyeur à lames la taille moyenne de la poudre obtenue est largement inférieure à celle obtenue par le broyeur à boulets après 16 h de broyage. Le broyeur à lames atteint une taille moyenne de poudre obtenue après 8 heures de broyage de l'ordre d'une valeur stable de 146 μm . Par contre, le broyeur à boulets produit une taille moyenne

stable après 16 heures de broyage de l'ordre de 308 μm , soit le double de la taille moyenne du broyeur à lames.

- De la figure 6.16, on remarque que les deux courbes ont la même allure, la taille moyenne de la poudre obtenue diminue en diminuant la masse initiale des copeaux mais, la courbe relative au broyeur à lames est en dessous de la courbe du broyeur à boulets. Pour une masse de 250 g, une condition optimale pour les deux broyeur on voit que la taille de la poudre obtenue pour le broyeur à lames est nettement inférieure que celle du broyeur à boulet, cette remarque est valable pour tous les autres cas.

7.8 ANALYSE DE LA FORME DE LA POUDRE OBTENUE

La forme des particules est un facteur très important dans les processus conventionnels de la métallurgie des poudres. C'est ainsi que la forme peut influencer positivement ou négativement sur le compactage et le frittage des comprimés de poudre, suivant que la forme des particules est sphérique ou irrégulière.

D'après l'observation microscopique des échantillons, la poudre obtenue a la même forme pour les paramètres optimisés suivants : la masse initiale des copeaux, la taille initiale des copeaux ou la vitesse de broyage. Cependant, la forme des particules de poudre évolue dans le temps.

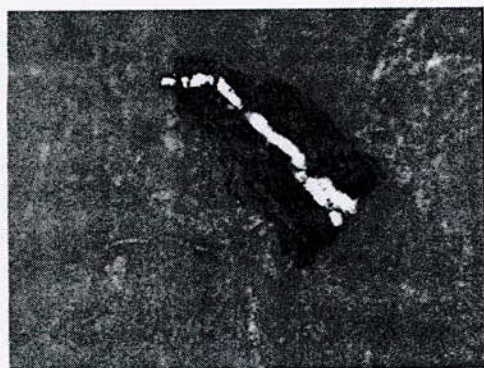
D'après les photos obtenues par microscopie optique, la masse de poudre est composée de trois formes principales. Une fraction de poudre à une forme semblable à des grains à café, une autre sphérique et la troisième est sous forme d'écaillés. La fraction de poudre sphérique est répartie du tamis de 315 μm jusqu'au tamis 75 μm . La fraction sous forme d'écaillés est retenue dans les plus fins tamis (53 μm et 38 μm) ainsi que dans l'assiette. Dans le tamis grossier (425 μm) la poudre retenue a la forme de copeaux mais en petite fraction de l'ordre de 5 % de la masse broyée. La forme à grain de café n'est rencontrée qu'aux temps de broyage bas (inférieur à 1 heure).

7.8.1 Influence du temps de broyage sur la forme de la poudre

Les copeaux initiaux subissent un changement dramatique en fonction du temps de broyage. Les observations microscopiques de la poudre après plusieurs temps de broyage nous donnent :

- Après 1 heure de broyage on observe une claire transformation des copeaux. Les figures (7.1, et 7.2) montrent la forme initiale des copeaux pour respectivement les copeaux fins et moyens. Notons ici que le copeau grossier n'a pu être photographié à cause de sa taille démesurément très grande par rapport aux grossissements disponibles utilisés. Les figures (7.3, a et b) montrent la forme des particules après 1 heure de broyage. d'après ces photos on remarque que le copeau se transforme d'une forme irrégulière fourchue vers une forme transitoire de grain à café. Cette mutation progressive des particules est causée par la déformation plastique des copeaux entre les outils

et la paroi du broyeur. Cette déformation plastique se réalise par cisaillement puis un micro-forgeage continu et progressif jusqu'à l'aboutissement de la forme obtenue.



a

Figure 7.1 : Photo-micrographie montrant
La morphologie du Copeau fin
G= 100 X



b

Figure 7.2 : Photo-micrographie
montrant le copeau moyen
G= 100 X



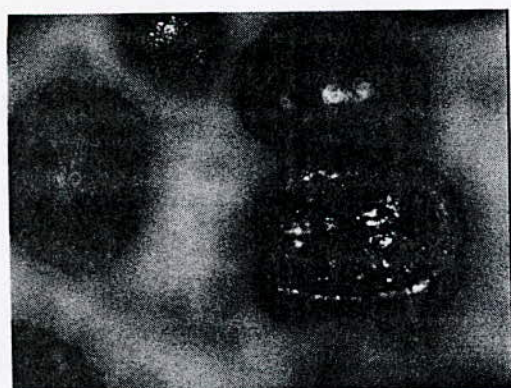
a



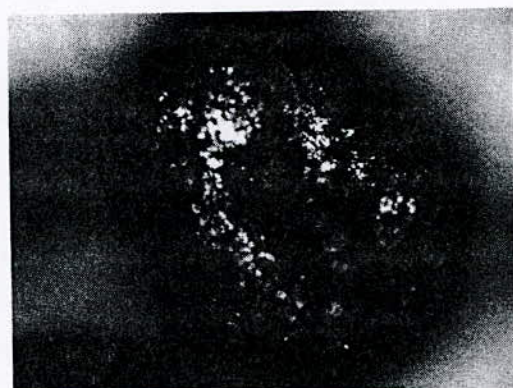
b

Figure 7.3 : Photo-micrographies montrant l'évolution morphologique de
la particule depuis le copeau vers une forme transitoire de grain à café
après 1 heure de broyage. G = 100 X

- La figure (7,4 a et b) montre l'évolution de la forme des particules après 2 heures de broyage. Les particules s'affinent de plus en plus, et leurs formes deviennent plus arrondies. La forme de grain à café commence à disparaître, par la fermeture du ventre du grain par déformation plastique, et roulement des particules sur la paroi inférieure circulaire du broyeur. La forme évolue d'un grain à café vers une autre forme intermédiaire semblable à celle des beignets.



a



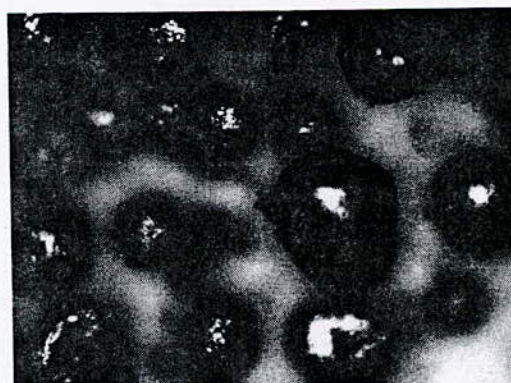
b

Figure 7.4 : Photo-micrographies montrant l'évolution morphologique de la forme grain de café à une forme plus arrondie après 2 heures de broyage : G = 100 X

- La figure 7.5 (a et b) ci-dessous montre l'évolution de la poudre depuis la forme des beignets vers une forme quasi sphérique. Ici on remarque la fermeture totale du ventre du grain par micro-forgeage continu ainsi que par roulement contre la paroi de la chambre du broyeur.



a



b

Figure 7.5 : Photo-micrographies montrant l'évolution morphologique de la particule depuis la forme des beignets vers une forme quasi sphérique après 4 heures de broyage. G = 100 X

Après 8 heures de broyage, les particules de poudre sont devenues quasi-sphériques. En augmentant le temps de broyage, on observe une évolution des particules vers une forme sphérique, avec l'apparition d'une grande fraction de particules en forme d'écaillés ou de flocons. Ces dernières sont tellement fines qu'elles s'agglomèrent avec les plus grosses particules à cause de la rugosité de surface. Ces particules sont montrées dans la figure 7.6 ci-dessous

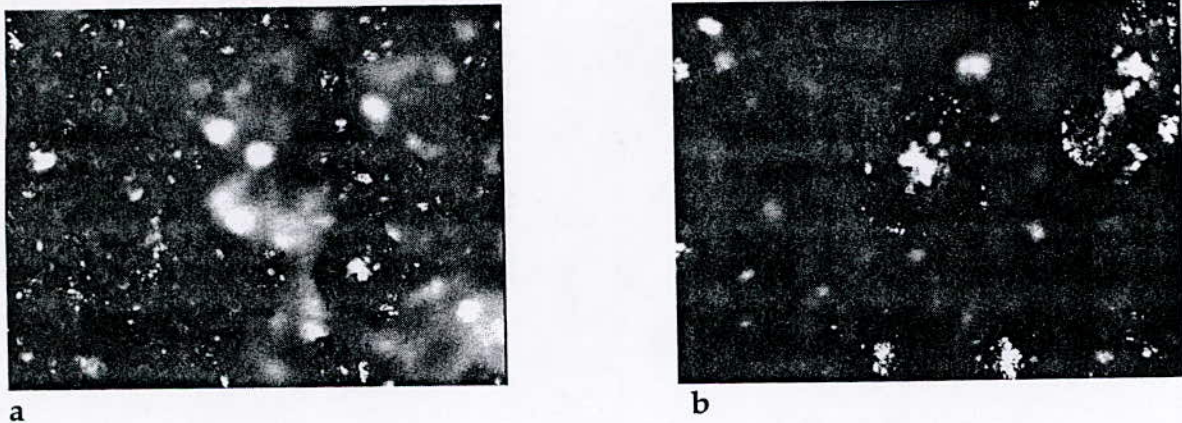


Figure 7.6 : Photo-micrographies montrant la morphologie sphérique et les écaillés de poudre après 8 heures de broyage. $G = 100 \times$

7.8.2 Répartition de la forme des particules de poudre dans les tamis

Comme précisé antérieurement, nous avons dit que la poudre obtenue a une certaine distribution à travers les tamis. Cette distribution est sous forme de cloche. D'après l'observation microscopique des fractions retenues dans les tamis, on a les remarques suivantes :

- On remarque d'après la figure 7.7 (a et b) que, les plus grosses particules retenues dans le premier tamis d'ouverture $425 \mu\text{m}$, ont toujours la forme du copeaux qui a une forme irrégulière. Ces particules n'ont pas eu la chance d'être percutées et roulées par les outils. Elles étaient peut être coincées dans certaines endroits du broyeur, non accessibles aux lames tranchantes des outils. Cependant, d'après les divers résultats de caractérisation, cette fraction est inférieure à 5 % dans tous les cas étudiés.

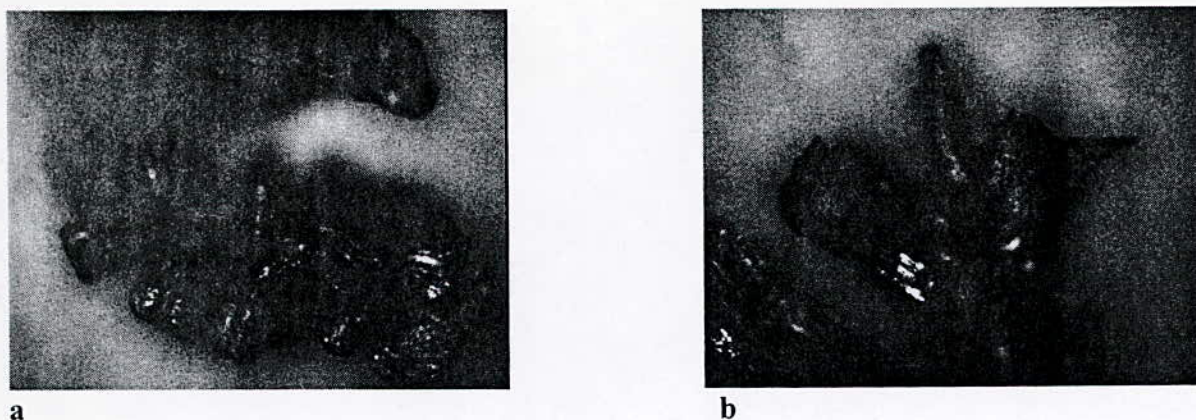


Figure 7.7 : Photo-micrographies montrant la morphologie des particules de poudre retenue dans le tamis d'ouverture 425 μm . G = 100 X

Pendant la caractérisation par tamisage de la poudre, on a constaté que la majeure partie de la poudre est retenue par les tamis du milieu de la série. Ceux-ci correspondent aux tamis d'ouverture 150 et 160 μm . D'après les observations microscopiques, on remarque que la majorité de ces poudres ont une forme sphérique. Une petite fraction de poudre possède une forme cylindrique. Les figures (7.8 et 7.9 a et b), illustrent ces remarques. La figure 7.8 (a et b) montre la morphologie de la poudre retenue dans le tamis d'ouverture 150 μm , et la figure 7.9 (a et b) montre la morphologie de la poudre retenue dans le tamis d'ouverture 106 μm . Cette morphologie sphérique est due au roulement des particules de poudre sur la paroi par les outils. On voit bien d'après les figures (7.8, 7.9) la différence de taille entre les particules.

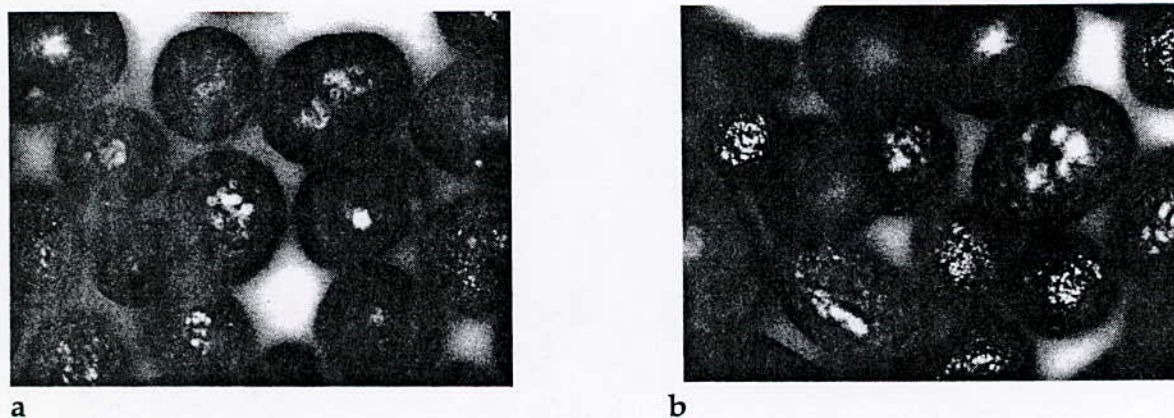


Figure 7.8 : Photo-micrographies montrant la morphologie des particules de poudre retenues dans le tamis d'ouverture 150 μm . G = 100 X

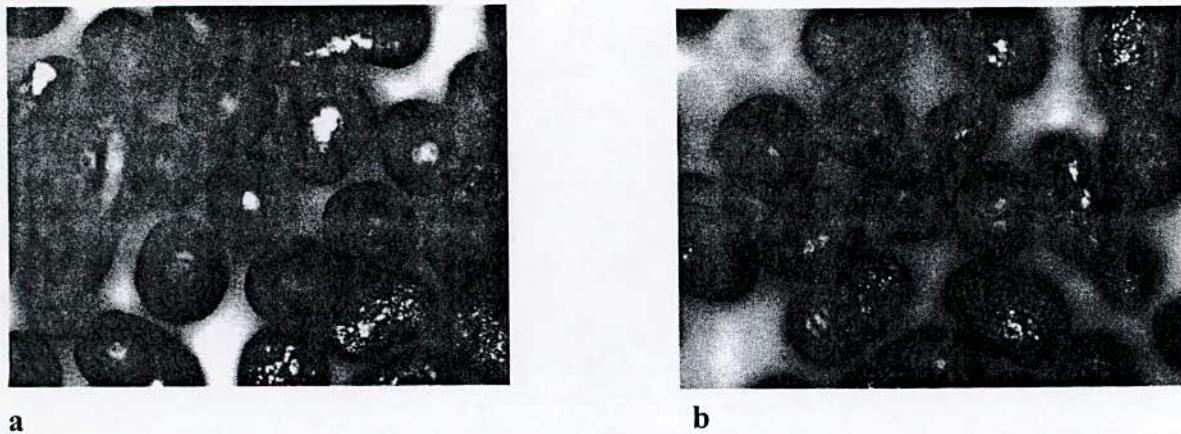


Figure 7.9 : Photo-micrographies montrant la morphologie des particules de poudre retenues dans le tamis d'ouverture $106 \mu\text{m}$. $G = 100 \times$

- La fraction fine de poudre retenue dans l'assiette est importante comme produit de broyage. La figure 7.10 (a et b), montre que la fraction fine est sous forme d'écaillés ou sous forme de flocons, avec des angles arrondis pour certaines et aigus pour d'autres. Cette fraction fine est le produit de l'attrition et de la fragmentation par percussion. L'arrondissement des angles se fait par roulement et rotation des particules dans la chambre de broyage.

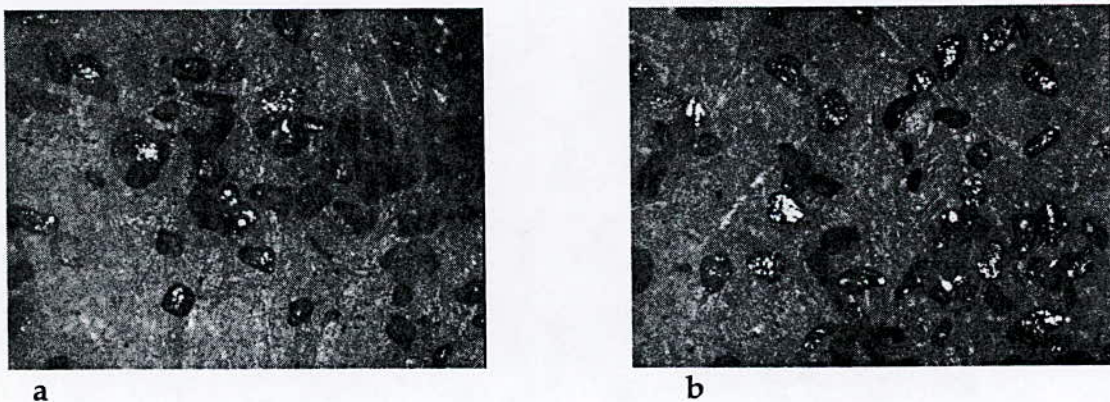


Figure 7.10 : Photo-micrographies montrant la morphologie de la fraction fine retenue dans l'assiette. $G = 100 \times$

7.9 EQUATION PARAMETRIQUE DE SIMULATION

L'équation paramétrique de simulation est la relation qui relie tous les paramètres influents sur la taille moyenne des particules de poudre. Ainsi, l'équation correspondante à notre broyeur est de la forme :

$$D_m = t^{-36.42} M_c^{0.12} V^{-0.18} \quad (7.1)$$

Où :

D_m : taille moyenne de la poudre produite (μm);

t : temps de broyage (h);

M_c : la taille moyenne du copeau initial (μm);

V : vitesse de broyage (trs/min).

Notons ici que la variable (C_i) relative à la taille initiale des copeaux n'apparaît pas dans cette équation, car elle n'influe pas sur le produit broyé obtenu.

7.10 OPTIMISATION DU PROCEDE

L'optimisation d'un procédé permet d'avoir une production de qualité optimale pour des coûts assez réduits. L'équation (7.1) permet de faciliter l'optimisation de ces paramètres pour la production d'une poudre de taille moyenne désirée. Par sa nature globale reliant tous les paramètres de broyage, cette équation peut être insérée dans un logiciel de simulation qui commande la production automatique du broyeur.

A partir des résultats obtenus, l'optimisation des paramètres influants pour aboutir à un broyage optimal sont :

- Un temps de broyage compris entre 1 heure et deux heures.
- Une vitesse maximale
- L'augmentation de la masse initiale des copeaux augmente la fraction fine, mais elle augmente aussi la taille moyenne des particules de poudre, ce qui est un inconvénient. D'où l'intérêt d'utiliser des copeaux à taille moyenne pour cumuler les avantages entre la fraction fine et la poudre fine.

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail nous avons étudié l'efficacité et l'influence des divers paramètres de broyage sur la taille moyenne et la forme des particules de poudre obtenue. Dans ce but, nous avons montré l'influence de ces paramètres sur le produit fini sous forme de courbes montrant la variation de la taille moyenne de la poudre obtenue en fonction de ces paramètres. A partir de ces courbes, nous avons établi une équation paramétrique globale reliant les quatre variables étudiées à la taille moyenne des particules de poudre produite. Cette équation peut servir dans le cadre d'une étude d'optimisation et de simulation par ordinateur du processus du broyage mécanique des poudres métalliques.

De cette étude en résumé les constatations suivantes :

- Le temps de broyage est un paramètre très influent sur la taille moyenne de la poudre obtenue. Une taille moyenne optimale est atteinte pendant une heure de broyage.
- La masse initiale influe négativement sur la taille moyenne des particules de poudre obtenue. En revanche, cette variable influe positivement sur le rendement du broyeur, en augmentant la masse de la fraction fine obtenue.
- La taille initiale des copeaux n'a pas d'influence sur la taille moyenne de la poudre obtenue. Cela est un avantage pour l'industrie de la MDP qui peut ainsi utiliser les copeaux de récupération sans se soucier de leur taille initiale ni de leur forme.
- La vitesse de broyage a une très grande influence sur le produit broyé obtenu. Car la vitesse est liée directement au phénomène de la percussion qui est un processus dominant dans ce type de broyeur.
- La morphologie des particules de poudre obtenue évolue en fonction du temps. Elle évolue de la forme des copeaux à une forme de grains à café vers une forme sphérique finale. Cependant, une fraction fine importante est obtenue comme résultat de l'attrition. La forme des particules de cette fraction ressemble à des écailles ou des flocons.

L'optimisation des variables de broyage a montré qu'en termes de rendement sous forme de fraction fine, le broyeur à lames fabriqué, est plus efficace que le broyeur à boulets.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. Y. Chin, *Advances in Powder Technology*, American Society for metals, 1981, p 5.
- [2] R. Kieffer ; W. Hotop, *Fer et Aciers Frittés*, Ed Dunod, 1959.
- [3] C. Chaussin ; G. Helly, *Elaboration des Métaux*, Ed Dunod tome 2, 1984.
- [4] A. J. Yule ; J. J. John, *Atomisation of Melts for Powders Production and Spray Deposition*, Oxford university press, 1994.
- [5] Richardson, F.D.; Jeffes, H.H.E, *The Thermodynamique of substances of insert in iron and steelmaking from 0 °C to 2400 °C*, *Journal of the iron and steel institute*, Vol 160, 1948, p 261.
- [6] G. Cizeron, *La Revue de Métallurgie CIT / Science et Genie de Matériaux*, Mai 1994, Pp. 683-392.
- [7] R. Mbybr, *Poudre Métallique, Techniques de l'injenieur*, Fasc M862, 1980.
- [8] M. Senna; H. Kuno, *Polymorphic Transformation of PbO by Isothermal Wet Ball-Milling*, *J. Am. Cerwn. Soc.*, Vol 54 (No. 5), May 1971.
- [9] Grifith, A.A., *Trans. Roy. Soc. Lond.*, Vol A221, 1921, p 163.
- [10] Gilvarry, J. J. and Borgstrom, B.M., *Fracture and Comminution of Brittle Solids*, *AIME Trans.*, Vol 220, 1961, p 380.
- [11] Harris, CC., *On the Limit of Comminution*, *Trans. Soc. Mining Eng.*, March 1967, p 17-30.
- [12] Domazer, H.G., *New Milling Process for Fine Grinding of Powder Alloys in a Gas-Tight Attrition Mill*, *Powder Metall.Int.*, Vol 10 (No. 3), 1978, p 150.
- [13] Kuhn, W.E., *High Energy Milling of Electrolytic Iron Powder*, *Modern Developments in Powder Metallurgy*, Vol 12, Metal Powder industries Federation, Princeton, NJ, 1980, p 195 - 218.
- [14] Rose, E. and Sullivan, R.M.E., *A Treastise on rite Internal Mechanics of Ball, Tube, and Rod Mills*, Chemical Publishing Co., New York, 1958.
- [15] U.S. Patent 4 172 720, Oct 1979.
- [16] British Patent 1 224 736, Jan 1969.
- [17] Patel, A.N. and Kuhn. W.E., *Influence of High Energy Vibra-Milling on the Annealed and Sintered Structures and Properties of a P/M Austenitic Stainless Steel*, *Modern Developments in Powder Metallurgy*, Vol 13, Metal Powder Industries Federation, Princeton, Ni, 1980, p 27-50.
- [18] U.S. Patent 4 115 107, Sept 1978.
- [19] Kuhn, W.E. and Lucky, H., *Characterization of Ball-Milled Type 316-L Stainless Steel Powder*, *Fine Particles*, W. Kuhn and J. Ehretsmann, Ed., The Electrochemical Society, Inc., 1974, p 95-121.

- [20] Gilman, P.S. and Nix, W.D., The Structure and Properties of Aluminium Alloys Produced by Mechanical Alloying: Powder Processing and Resultant Powder Structures, *Met, Trans.*, Vol 12A, May 1981, p 813.
- [21] P. Ansart, *Les Propriétés du Cuivre et de ces Alliages*, Ed Variences, 1992, p 36-43.
- [22] R. Chaouche; A. Kasser, *Elaboration d'une poudre de laiton par broyage mécanique des copeaux d'usinage*, ENP Genie Métallurgie, 2000, p 76.
- [23] A.Rezuoali; A. Kasser, *Optimisation des Variables de Broyage Mécanique des Copeaux de Bronze*, 2001, p 76.