

**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**  
**D'ANTANANARIVO**

**Département Mines**

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention  
du diplôme d'Ingénieur des Mines**

**CONCEPTION ET REALISATION  
D'UN BROYEUR A BOULETS**

**Présenté par :**

**RAZAFINDRAKOTO Vaojaniriana Rado**

**Membre du jury :**

**-Président :** Monsieur RASOLOMANANA Eddy Harilala  
**-Encadreur:** Monsieur RANDRIANJA Roger  
**-Examineur :** Monsieur RANAIVONIRIVO Velomanantsoa Gabriely  
Monsieur RAKOTONIAINA Andrianarisoa  
Monsieur RAKOTONINDRAINNY

**Date de soutenance : 21 Avril 2001**

**PROMOTION 2000**

# REMERCIEMENTS

Nous exprimons nos remerciements à toutes les personnes qui contribuent leurs grâces et leurs aides. En particulier,

Monsieur RANDRIANOELINA Benjamin, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, nous autorise à faire ce mémoire,

Professeur RASOLOMANANA Eddy Harilala, Chef de département Mines à l'ESPA , responsable des études durant ces trois années de formations de la filière Mines.

Nos hautes et fidèles considérations aux membres de jury :

- Professeur RANDRIANJA Roger, Enseignant – Chercheur au département Mines de l'ESPA,
- Monsieur RAKOTONIAINA Andrianarisoa , Enseignant -Chercheur à département l'ESPA, Chef principal du Bloc Technique – Ankatso,
- Professeur RAKOTONINDRAINNY Enseignant – Chercheur au département Mines de l'ESPA.

En outre, nous dédions nos vifs remerciements à toutes les personnes du Bloc technique Ankatso, qui n'ont pas épargné leur savoir –faire pour la réalisation de la machine.

Nous formulons particulièrement notre reconnaissance à notre mère, et à tous les membres de la famille pour ses soutiens matériels et moraux.

Je dédie aussi ce livre à Mademoiselle HANITRINIAINA Lalatiana Lucia qui a offert ses sentiments pendant la réalisation de ce mémoire.

A vous tous, amis et collègues, qui de près ou de loin, avez contribué à la confection du présent ouvrage, nous relierons notre reconnaissance pour vos apports incommensurables.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Marche en CASCADE
Figure 2	: Marche en CATARACTE
Figure 3	: Trajectoire parabolique d'un boulet
Figure 4	: Superposition des boulets
Figure 5	: Usure des boulets
Figure 6	: Dessin des boulets
Figure 7	: Corps du broyeur
Figure 8	: Couvercle n°2 palier
Figure 9	: Couvercle n°1 palier
Figure 10	: Support palier
Figure 11	: Couvercle broyeur
Figure 12	: Couvercle couronne
Figure 13	: Couvercle fixe
Figure 14	: Bout d'axe
Figure 15	: Axe roue libre
Figure 16	: Corps palier (au niveau de la poulie menante)
Figure 17	: Axe au niveau de la poulie
Figure 18	: Courbe granulométrique $y_{\text{refus}} [\%] = f(D_p)$ ( $t_1=40$ mm)
Figure 19	: Courbe granulométrique $y_{\text{refus}} [\%] = f(D_p)$ ( $t_2=30$ mm)
Figure 20	: Courbe granulométrique $y_{\text{refus}} [\%] = f(D_p)$ ( $t_3=25$ mm)
Figure 21	: Courbe granulométrique $y_{\text{refus}} [\%] = f(D_p)$ ( $t_4=15$ mm)
Figure 22	: Courbe granulométrique $y_{\text{refus}} [\%] = f(D_p)$

# LISTE DES TABLEAUX

- Tableau n°1 : Nomenclature des pièces
- Tableau n°2 : Devis quantitatifs et qualitatif estimatif
- Tableau n°3 : Analyse granulométrique ( $t_1 = 40$  mm)
- Tableau n°4 : Analyse granulométrique ( $t_2 = 30$  mm)
- Tableau n°5 : Analyse granulométrique ( $t_3 = 25$  mm)
- Tableau n°6 : Analyse granulométrique ( $t_4 = 15$  mm)

# **SOMMAIRE**

## **INTRODUCTION**

## **PREMIERE PARTIE : ETUDE ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES**

### **I. GENERALITES**

I.1.Définition

I.2.Broyeur à boulets

I.3.Broyage sec et broyage humide

I.4.Rapport de réduction [r]

I.5.Broyabilité [B]

I.6.Surface spécifique

### **II. LE BROYEUR A BOULETS**

II.1. Mécanisme de fonctionnement

II.1.1. Rotation à vitesse lente

II.1.2. Rotation à vitesse élevée

II.2. Etudes analytiques

II.2.1. Trajectoire des boulets

II.2.2. Vitesse critique du broyeur

II.2.3. Vitesse pratique du broyeur

II.2.4. Degré de remplissage

II.2.5. Relation entre vitesse et degré de remplissage

II.2.6. Force motrice d'un broyeur de la productivité

II.2.6.1. Force motrice

II.2.6.2. Productivité

II.2.7. Energie de broyage – Formule de Bond

II.2.8. Usure des corps broyants

## **DEUXIEME PARTIE: ETUDE DE CONCEPTION DU BROYEUR**

### **I. GENERALITES**

I.1. Calcul de la charge

I.2. Diamètre de boulet en fonction du diamètre intérieur

### **II. DETAILS TECHNOLOGIQUES**

II.1. Les éléments tournants

II.2. Les éléments constitutifs

II.3. Alimentation électrique

II.4. Entretien de la machine

II.4.1. Entretien préventif

II.4.2. Entretien périodique

II.4.3. Entretien curatif

II.5. Devis quantitatif et devis estimatif

## **TROISIEME PARTIE: ESSAIS EXPERIMENTAUX**

### **I. GENERALITES**

I.1. Mise en marche de la machine et précaution

I.2. Protection de l'environnement

### **II. ESSAI DE BROYAGE**

II.1. Objet de l'essai

II.2. Méthode

II.3. Appareillage

II.4. Expérience

II.5. Résultats

### **III. ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

III.1. Définition

III.2. Analyse granulométrique d'un lot de particules de calcaire.

III.3. Interprétation

III.4. Conclusion

## **CONCLUSION**

## **BIBLIOGRAPHIE.**

# INTRODUCTION

Depuis son existence, le Département Mines de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo se plaint, lui aussi comme d'autres Départements du manque de matériels. Ce contexte se traduit de concevoir un matériel apte à satisfaire les besoins en équipement pour améliorer les études.

De plus pendant ses trois années de formation, les ingénieurs des mines peuvent exposer ses savoir-faire théorique et pratique dans le cadre technique.

Cet appareil que nous avons conçu peut participer ne serait ce qu'en tant que complément des matériels existants dans notre laboratoire. Fort, de cette conscience, il nous a été de concevoir et de réaliser un prototype de broyeur a boulets.

A priori, cette machine est destinée au traitement de minerais pour leur fragmentation d'une part, et essentiellement pour le broyage d'autre part.

Pour ce faire, cet ouvrage est subdivisé en trois parties interdépendantes dont:

- La première est consacrée aux études et rappels bibliographiques concernant la notion générale du broyeur à boulets.
- La deuxième est destinée à l'étude de conception du broyeur à boulets en vue de son élaboration et aux détails technologiques liés à sa fabrication.
- La troisième se rapporte aux essais expérimentaux afin de tester la performance de ce broyeur suivi d'une analyse des résultats obtenus.

# **PARTIE I**

## **ETUDES ET RAPPELS**

### **BIBLIOGRAPHIQUES**



# **PARTIE I**

## **ETUDES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES**

### **I. GENERALITES [3], [4]**

La présente partie est conçue à décrire et à analyser par le moyen d'une compilation bibliographique et documentaire ce qu'est le broyeur. En effet, de par les ouvrages que nous avons feuilletés, il existe des points communs sur les broyeurs. Paradoxalement, on assiste également à l'existence de diversité.

Cette dernière se rencontre au niveau du mécanisme de fonctionnement.

À plus forte raison, on peut aller plus loin moyennant des études analytiques à base de mécanique.

Ces multiples points font l'objet essentiel de ce premier volet.

#### ***1.1. Définition [1] [4]***

Par une définition large, le broyage est une des opérations utilisées au niveau de la fragmentation des minerais. Ce procédé consiste à une réduction des grains des minerais en état fin par émiettement.

A priori, dans le domaine minier et Génie civil, l'opération de broyage précède de concassage.

On distingue, selon la classification existante, trois types de broyage :

- broyage grossier dont la dimension des produits ainsi obtenus est comprise entre 0,5 mm à 3 mm;
- broyage moyen allant de 0,2 mm à 0,5 mm;
- broyage fin en dessous de 0,1 mm et même émietté (poudre).

Mais on peut obtenir ces trois étapes de broyage en même temps pour la conjugaison de la durée de cette opération avec la technologie adoptée par le broyeur.

### ***1.2. Broyeur à boulets [1] [4]***

Il existe différents types de broyeur tels que :

- broyeur à barre ;
- broyeur à galet ;
- autobroyeur.

Mais ce qui a fait l'objet du présent mémoire est le broyeur à boulets.

De par ses caractéristiques, le broyeur à boulets est constitué par un corps métallique tubulaire

A l'intérieur du tambour, il existe de charge qu'on appelle les corps broyants qui sont composés par des boulets métalliques sphériques ayant un diamètre bien déterminé et à une dureté relativement supérieure à celle des minerais à broyer et les minerais.

Notons que le nombre des boulets est déterminé arbitrairement en fonction de quelques paramètres. De plus, l'ensemble tourne autour d'un axe parallèle à celui du cylindre à l'aide d'un moteur d'entraînement.

### ***1.3. Broyage à sec et broyage humide***

Selon le degré d'humidité où l'opération est effectuée, on distingue la typologie de broyage suivante :

- broyage à sec (moins de 2% d'eau dans le produit) ;
- broyage semi-humide (2 à 25% d'eau dans le produit) ;
- broyage à voie humide (25 à 300% d'eau dans le produit).

De plus, le choix de broyage, par voie humide ou sèche est conditionné par l'utilisation ultérieure-des produits broyés ainsi que leur mode de concentration.

### ***1.4. Rapport de réduction [r] [1]***

Le rapport de réduction [r] d'un appareil de fragmentation est déterminé par la valeur du rapport.

$$r = \frac{D}{d} \quad (1)$$

Ce rapport de réduction est adimensionnel.

Où,

D est la dimension des plus gros morceaux de l'alimentation,

d est la dimension des plus gros morceaux à la sortie de l'appareil après traitement.

Mais toutefois, par défaut de dimension des matières à broyer, on considère l'ouverture de la maille du tamis à travers duquel on a 80% de passant comme référence de mesure.

$$r = \frac{D_{80}}{d_{80}} \quad (2)$$

Avec,

$D_{80}$  est la dimension de la maille du tamis correspondant à 80% de passé au travers, du produit d'alimentation,

$d_{80}$  est la dimension de la maille du tamis correspondant à 80% de passé au travers, du produit obtenus.

### **1.5. Broyabilité [B] [1]**

La broyabilité d'une matière est son aptitude à la fragmentation qui se définit comme la réaction de cette matière à l'effort de fragmentation. Elle ne dépend pas de la dureté minéralogique, mais elle est par contre en relation avec le type de cassure de la matière.

En effet, la broyabilité est faible si les cassures sont du type conchoïdal, et elle est élevée ou forte si les clivages des minéraux sont relativement faciles (Par exemple : le graphite).

D'après la formule de RITTINGER, la broyabilité est définie comme suit :

$$B = \frac{\Delta S}{W} \quad (3)$$

Où,

$\Delta S$  : la variation de surface spécifique de la matière en  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,

$W$  : le travail nécessaire par unité de masse du produit en Joule/g.

$B$  : la broyabilité en  $\text{cm}^2/\text{Joule}$ .

### ***I. 6. Surface spécifique***

C'est la surface représentée par l'ensemble des grains du matériaux à l'unité de masse. Elle s'exprime généralement en  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

A noter que la connaissance de cette surface spécifique permet la détermination du degré de finesse d'un produit.

## **II. FONCTIONNEMENT [3] [4]**

### ***II.1. Mécanisme***

Sous l'effet du mouvement rotatif du corps broyeur (le cylindre, le tubulaire), les boulets métalliques et les matières à broyer sont entraînés, roulent et retombent les uns sur les autres. La matière à broyer est soumise à différentes actions de pression, d'attrition (ou de frottement), et de choc tant entre les boulets qu'entre ceux-ci et la paroi blindée du cylindre. Le broyeur à boulets peut fonctionner suivant deux régimes distincts selon la vitesse de rotation.

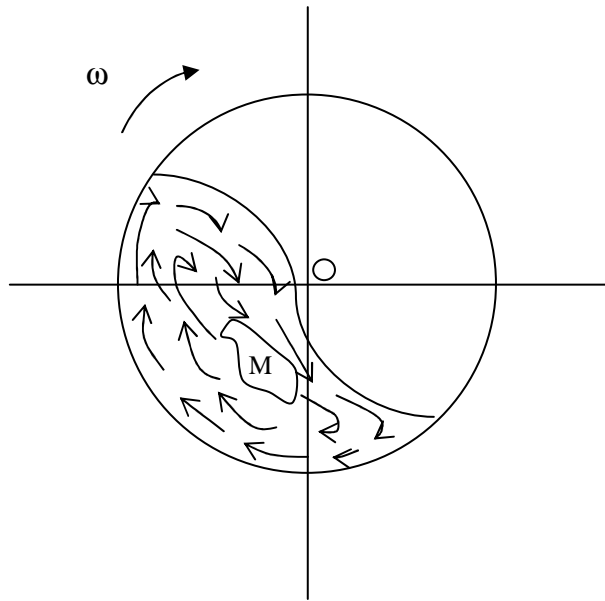
#### ***II. 1.1. Rotation à vitesse lente : (figure 1)***

En appliquant ce régime, on observe le phénomène suivant, la charge du broyeur prend une forme d'équilibre dynamique représentée sur la figure 1, la charge a un mouvement général de rotation autour d'une petite zone M appelée « Zone morte » qui reste théoriquement immobile.

Ces corps broyants s'élèvent en suivant des trajectoires approximativement circulaires et concentriques dont le centre est parallèle de l'axe du broyeur, puis retombent en roulant les uns sur les autres.

Le broyage s'opère par attrition en faisant intervenir essentiellement des forces de cisaillement.

On appelle cette marche « La marche en CASCADE ».



**Figure 1 :** Marche en cascade : Le point M est immobile

### ***II.1.2 Rotation à vitesse élevée (figure 2)***

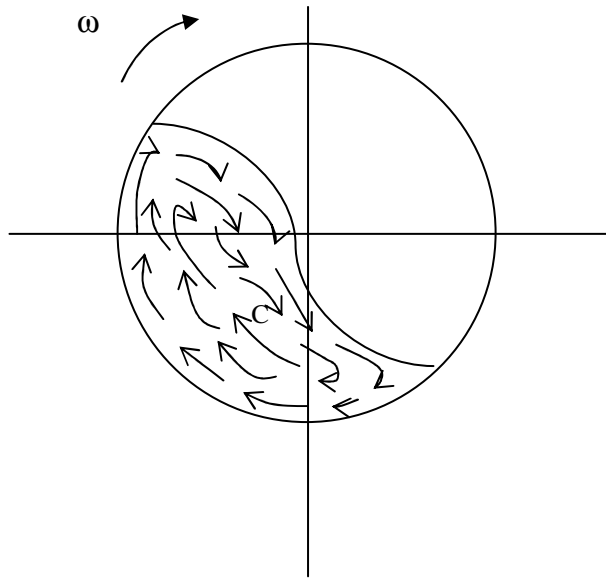
On constate dans ce deuxième régime que les trajectoires du corps broyants comportent une partie en chute libre (figure 2)

Cette chute se termine au pied de la charge.

Les grains sont tirés par la force centrifuge jusqu'à une hauteur qui est fonction de la vitesse de rotation du cylindre. Au-delà de ce point, le poids des boulets l'emporte sur la force centrifuge et la chute se produit jusqu'au pied de la charge.

Cette chute va alors créer un choc et non du frottement, car le travail de frottement provenant de la rotation des boulets est relativement faible sauf au point plus bas où la masse de la charge est plus grande et donnant une accélération périphérique à l'appareil. Ce type de marche est dit « CATARACTE ». C'est le procédé fréquemment utilisé car la marche en cascade ne permet pas d'assurer le broyage des gros minéraux dont les dimensions dépassent quelques millimètres, et en outre, durs et abrasifs.

Les mouvements sont complexes et les paramètres sont plus ou moins dépendant les uns des autres. Il faut faire des hypothèses simplificatrices pour pouvoir exprimer mathématiquement le problème des trajectoires.



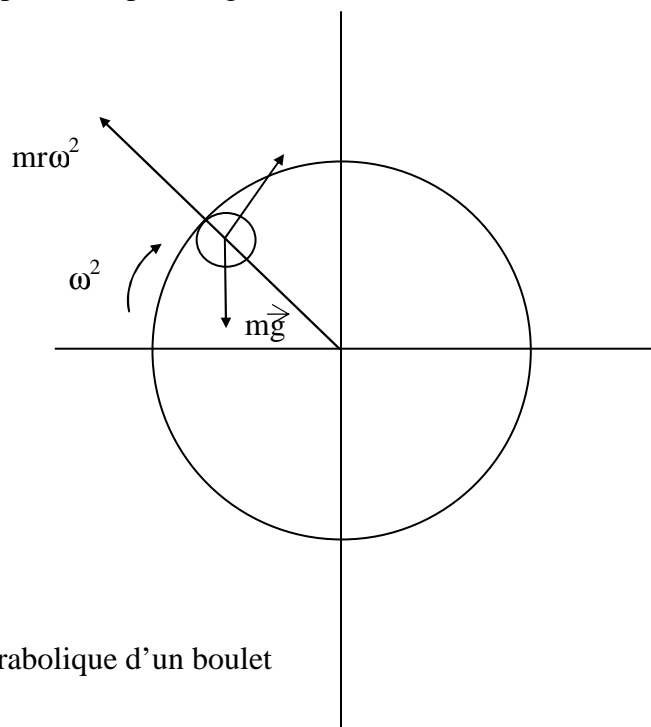
**Figure 2:** Marche en CATARACTE : Au-delà du point C la gravité est prépondérante

## II.2 Etudes analytiques [3] [4]

Cette étude consiste à montrer les processus du mouvement des boulets et le cylindre du broyeur et ses effets sur le broyage

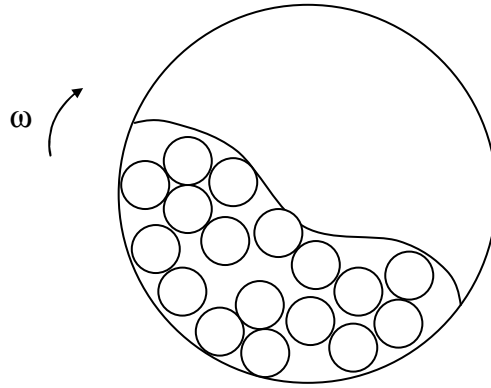
### II.2.1. Trajectoire des boulets

Le trajectoire d'un boulet est considéré comme parabolique pendant le mouvement rotatif du broyeur. On adopte, à un point où on aura une relation dynamique particulière. Sa position est représentée par la figure ci-dessous.



**Figure 3 :** Trajectoire parabolique d'un boulet

Ainsi pour l'ensemble, on observe la superposition des boulets dans le cylindre.



**Figure 4** : Superposition des boulets

### II.2.2. Vitesse critique du broyeur [1]

La vitesse de rotation du broyeur est choisie telle que la vitesse de chute de masse des corps broyants sur la charge soit maximale entraînant une énergie cinétique, optimale des corps broyants.

A partir d'une vitesse appelée vitesse critique la charge de boulets commence à être centrifugée, la force centrifuge contre balançant la force de pesanteur sur la masse broyante. La valeur de cette vitesse critique est donnée par la relation :

$$N_c = \frac{42,7}{\sqrt{D}} \quad [\text{tr/min}] \quad (3)$$

Où

D est le diamètre intérieur du cylindre, en [m].

### II.2.3. Vitesse pratique dit broyeur [1]

L'efficacité maximale par la vitesse relative de chute du boulet à un point d'impact serait obtenue lorsque la vitesse de rotation correspond à 75% de la vitesse critique .

$$N_p = 0,75 \times N_c \quad N_p = \frac{32}{\sqrt{D}} \quad [\text{tr/min}] \quad (5)$$

D étant le diamètre intérieur du cylindre, en [m].

#### II.2.4. Degré de remplissage [ $\tau$ ]

En général, le volume de la matière à broyer présent dans l'appareil ne doit pas excéder le volume des vides susceptibles d'exister entre les corps broyants, soit au maximum 35 à 40% du volume total de la charge.

Le degré de remplissage est le rapport entre le volume apparent de charge en boulets et le volume total intérieur du broyeur.

$$\tau = \frac{\text{Volume apparent de la charge en boulets}}{\text{Volume total intérieur du broyeur}} \quad [\%] \quad (6)$$

#### II.2.5. Relation entre vitesse et degré de remplissage :

Chaque degré de remplissage (ou taux de remplissage) correspond à une vitesse de rotation dans laquelle les boulets effectuent son travail maximal. D'après la formule de RAZUMOV, on a:

$$N = \frac{8}{\sqrt{D}} [5\tau + 2] \quad (7)$$

Où,

N est la vitesse optimale, en [tr/mn],

D est le diamètre intérieur du tambour.

Pour :

$$N = \frac{32}{\sqrt{D}} \quad \text{on a } 32 = 8(5\tau + 2)$$

$$\Rightarrow 5\tau = 2 \Rightarrow \tau = 2/5 = 0,5$$

$\tau = 40\%$
---------------



## II.2.6. Force motrice d'un broyeur et la productivité

### a) La force motrice

La force motrice nécessaire pour faire entraîner le cylindre contenant des corps broyants est fourni par le moteur électrique. Le moteur est bien choisi de telle façon à avoir une puissance, une vitesse variable selon la possibilité du mécanisme, et une fréquence définie. Et à partir de ces caractéristiques, on tire le nombre de tour par unité de temps qu'il a effectué. Ainsi la vitesse de rotation de la poulie principale va déterminer celle de la poulie secondaire reliée entre elles par une courroie. Cette dernière sera choisie par des calculs dans la partie suivante.

En général, elle est définie comme suit :

$$F = C.T . D^{0.5} \text{ (8)}$$

Où,

C est une constante,

T est le poids de la charge en tonne,

D est le diamètre intérieur du cylindre en [m],

### b) Productivité [1]

La productivité du broyeur est déterminée à partir de la capacité du cylindre, de sa vitesse de rotation, la broyabilité de la matière à broyer, et le taux de remplissage.

#### **Remarque :**

Pour le travail effectif du broyeur en tenant compte du chargement optimal des boulets,

- si  $\tau$  diminue le chargement n'est pas suffisant, il y a diminution du rendement ;
- si  $\tau$  augmente la vitesse croît, on dépense de l'énergie.

### II.2.7. Energie de broyage - Formule de Bond [I]

#### a) Formule de BOND

BOND a singularisé et a mis en relief l'aptitude au broyage de chaque substance moyennant un indice anglosaxon dit "work index" et qui porte son nom appelé "Indice de BOND". Il s'agit précisément du travail indispensable dans la réduction d'un Short-ton (907Kg) de minerais d'une dimension ayant une infinité théorique. Autrement dit, à une dimension de 100 microns ( $\mu$ ), telle que 80% en produit passe au tamis de 100 $\mu$  de l'ouverture de la maille.

BOND, dans sa formule, a exprimé :

$$W_i = \frac{k}{\rho_s} \times \left[ \frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{x}} \right] = \frac{k}{10\rho_s} [Kwh / St] \quad (9)$$

Considérons,  $D_{80}$  et  $d_{80}$  les ouvertures de mailles des tamis. Ils y passent respectivement 80% DE L'alimentation et 80% du produit broyé.

#### b) Energie du broyage

Le travail indispensable dans la réduction de la matière partant de  $D_{80}$  jusqu'au produit  $d_{80}$

s'exprime par :

$$W = \frac{k}{\rho_s} \left[ \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right] [Kwh / St] \quad (10)$$

$$W = \frac{10W_i}{0,907} \left[ \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right] [Kwh / St]$$

A noter que :

$W_i$  est donnée dans le tableau de valeur des indices de BOND. Le calcaire a fait l'objet de cette étude grâce à sa disponibilité aux essais .

Après calcul, nous avons obtenu : (  $W_i$  calcaire = 12,54 Kwh/st).

Poids spécifique,

$$\rho_S = 2,65 \text{ kg/g}$$

Selon ces caractéristiques mécaniques, nous pouvons déterminer l'énergie de broyage du calcaire.

$$W = \frac{10 \times 12,54}{0,907} \left[ \frac{1}{80^{1/2}} - \frac{1}{8000^{1/2}} \right] = 13,9 \text{ Kwh/t} \quad (11)$$

$$W = 13,9 \text{ Kwh/t}$$

avec,

$$d_{80} = 80 \text{ microns}$$

$$D_{80} = 8000 \text{ microns}$$

#### II.2.8. Usure des corps broyants [3] [4]

L'usure des corps broyants d'un broyeur dépend de quelques paramètres: tels que la marche du broyeur, la dureté du métal, l'abrasivité des minerais à broyer, et la durée d'utilisation.

Elle est causée de :     - frottement  
                                      - choc

En effet, on peut avoir des relations entre le diamètre des boulets sphériques et le temps d'utilisation du broyeur.

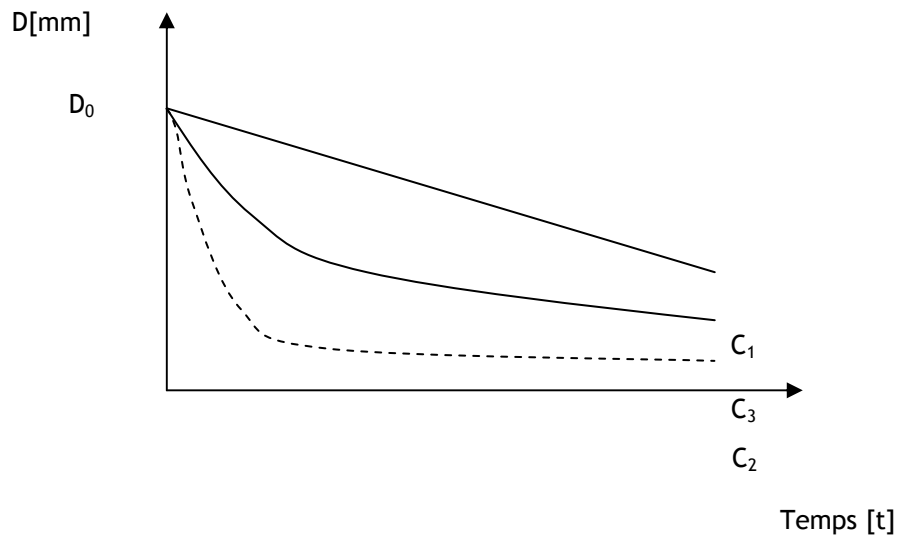
- Usure due au frottement

$$D = D_0 - K't \quad (12)$$

- Usure due au choc

$$D = D_0 \times e^{-K''t} \quad (13)$$

Les équations peuvent représenter par des courbes dans l'annexe.



: ( $C_1$ ) :  $D = D_0 - K't$

: ( $C_3$ ) : Courbe pratique

: ( $C_2$ ) :  $D = D_0 - e^{-K''t}$

**Figure 5** : Courbes représentatives l'usure des boulets en fonction de leur temps d'utilisation.

# **PARTIE II**

## **ETUDE DE CONCEPTION**

### **DU BROYEUR**

## PARTIE II

### ETUDE DE CONCEPTION DU BROYEUR A BOULETS

#### I. GENERALITES [3] [6]

##### *1.1. Calcul de la charge*

Ce calcul a été fait tout en tenant compte les hypothèses suivantes:

- ◆ Diamètre intérieur,  $\phi$  int. qui est égal à 10 cm.
- ◆ Diamètre extérieur,  $\phi$  ext. dont la valeur est de 11 cm.
- ◆ Longueur intérieure, L ayant une valeur de 11 cm qui remplit la charge.

Les formules ci-dessous ont été conçues pour exprimer les différents volumes indispensables dans la détermination de la charge:

- Le volume intérieur :  $\pi r^2 L$ .

Par application numérique, nous avons trouvé :  $\pi \times 5^2 \times 11 = 863.93 \text{ cm}^3$

- Le volume occupé par les boulets est égal à :  $863,93 \times 0,4 = 345,57 \text{ cm}^3$

- Le volume occupé par la matière à broyer :  $345,57 \times 0,4 = 138,57 \text{ cm}^3$

##### *1.2. Diamètre de boulet en fonction du diamètre intérieur du broyeur: [3] [4]*

Cette conjugaison boulet et broyeur dépend d'un certain nombre de paramètre à tenir en compte. Il s'agit principalement du diamètre du broyeur, diamètre de la matière à broyer et sa broyabilité.

Elle se formule par 
$$\Delta = \frac{b \times (\phi_{80})^{0,4}}{\sqrt[3]{B.D}} \quad (15)$$

Avec,

- $\Delta$  : diamètre du boulet en [cm].  
 $D$  : diamètre intérieur du cylindre en [m],  
 $\phi_{80}$  : dimension de la matière à broyer [ $\mu$ ],  
 $B$  : Broyabilité de la matière.

A noter que :

b est une constante dépendant de la conception y afférente .

Par simplification, tout en connaissant les valeurs de divers paramètres, nous avons obtenu comme expression de  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{k}{\sqrt[3]{B.D}} \quad (16)$$

Dans laquelle, k a une valeur conceptive de 1,25 d'où  $\Delta$  est égal à 2,7cm après calcul.

### ***1.3 Nombre de boulets***

Pour la détermination du nombre de boulets, nous avons utilisé la formule :

Son expression mathématique est :

$$n = \frac{0,6V'_B}{V} = \frac{0,6V'_B}{\frac{\pi d^3}{6}} \quad (14)$$

Où,

- $V'_B$  : volume apparent des boulets.  
 $d$  : diamètre du boulet en [m]  
 $V$  : volume d'un boulet.

Par application numérique, nous avons obtenu :

$$n = \frac{0,6 \times 6 \times 345,57}{\pi(2,7)^3} = 20,118$$

Alors, nous avons la valeur de n :

$n = 20 \text{ boulets}$
--------------------------

## II. DETAILS TECHNOLOGIQUES

### *II.1. Les éléments constitutifs du broyeur :*

Ces éléments comprennent toute une panoplie de matériels dûment conçus, à savoir :

- Le moteur avec une puissance de 0,5 cheval, avec 998tr/min. Il peut être branché sous tension de 440 V, 380 V et 220 V. L'installation du moteur nécessite un condensateur de 16  $\mu$  F pour l'alimentation électrique de 220 V,

(Figure 6)

- Le corps est constitué par un tube métallique en acier dont le diamètre intérieur est de 10cm et celui de extérieur est de 11cm. Ce tube contient la charge, fabriquée en thermoplastique et de chlorure de polyvinyle. (Figure 7)
- Le fond - couvercle est en tôle découpée et soudée au fond du corps, d'épaisseur 1cm. (Figure 14).
- Le couvercle - couronne, il est fabriqué en tôle TPN trouée et est soudé à l'autre extrémité du tube, (figure 13)
- Les axes et bout d'axes sont en acier X C38,  $\phi$  40 au nombre de deux chacun. (Figure 16 et 17).
- Les paliers, il s'agit d'une couverture, d'encastrement pour les roulements. Ce sont aussi de supports pour les axes et le corps. (Figure 15)
- Les roulements : de nombre 4, référence SKF 6004 de dimension  $\phi$  42 x  $\phi$  20 x 12.



- La poulie placée au niveau du moteur, appelée: "poulie menante", fabriquée en acier A<sub>50</sub>,  $\phi_{53}$ , une autre fixée au niveau de l'axe - rouleau en acier A<sub>50</sub> $\phi_{53}$

(Figure 16)

- La deuxième fixée au niveau de l'axe appelée poulie menée est fabriquée en acier A50  $\phi_{153}$
- La courroie, ayant une section trapézoïdale, ayant une dimension à 9mm x 7mm x 5mm  
dont:
  - la longueur est de 910 mm
  - Un angle est de 34°
  - La marque de fabrication est HUTCHINSON .
- Les vis et boulons, quatre de M8 d'entre - eux sont insérés au niveau du moteur ; un de M6 vissés au niveau des paliers ; quatre de M8 sont fixes au niveau du moteur, dont un sur le moteur et un autre sur l'axe.
  - 6 de M8 dont 4 sont insérés pour la fixation du moteur ; un au niveau de la poulie Menée;
  - 11 de M6 dont 3 au niveau du couvercle du corps, 8 pour la fixation des paliers ;
- Le bâti : il est composé de cornières coupées et soudées pour former une table métallique avec une dimension de 25 x 35 mm.

## ***II. 2. Entretien de la machine :***

Les entretiens à faire sont les suivants :

Entretien préventif

Entretien périodique

Entretien curatif.

### ***II. 2.1. Entretien préventif***

Cet entretien comprend :        le nettoyage ;  
   le brossage

Suivant les utilisations pour la pérennisation de la machine

### *II.2.2 Entretien périodique*

Cet entretien doit être fait périodiquement pour ne pas dire trimestriellement :

- ❖ Ajout de graisse au niveau du moteur, des paliers et des roulements ;
- ❖ Dépoussiérage au niveau des pièces tournantes.

### *II.2.3. Entretien curatif :*

En cas de panne, on peut procéder par les points suivants :

- ❖ Il est strictement conseillé de consulter un électromécanicien ;
- ❖ Se familiariser avec le principe de fonctionnement de cet outil.

Le schéma d'ensemble de cet appareil est illustré dans la Figure 6

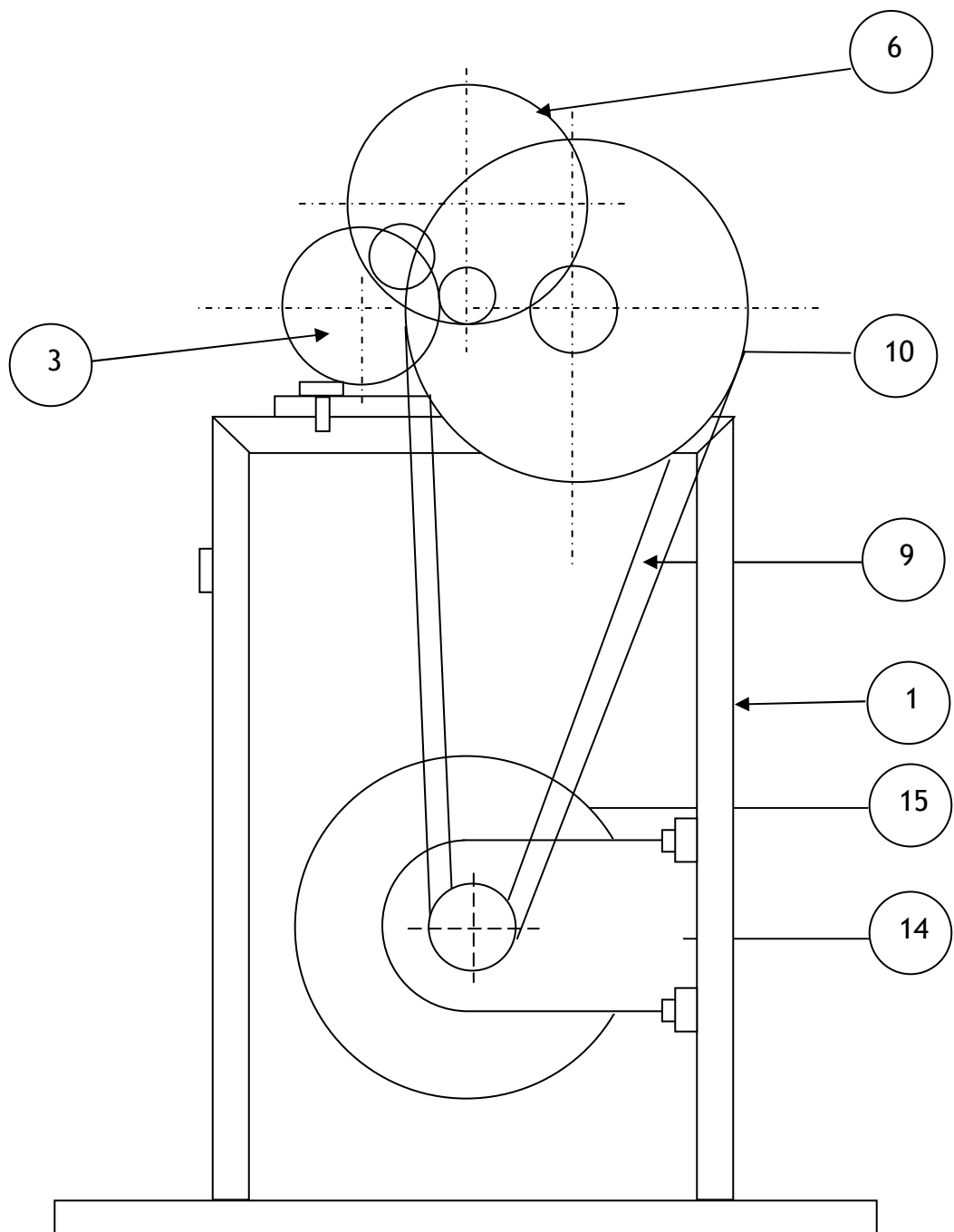
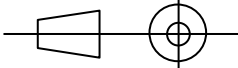
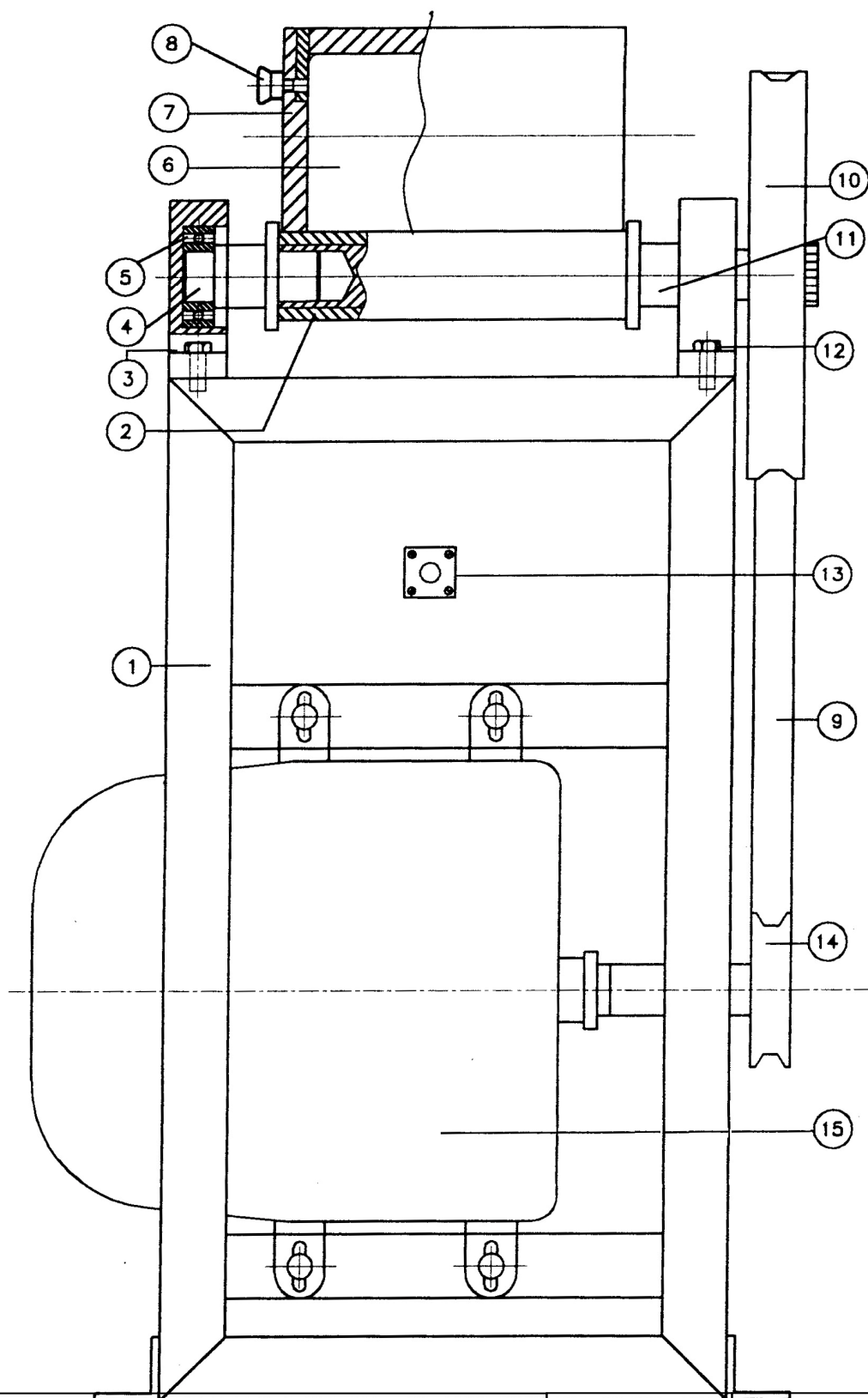


Figure 6	<b>BROYEUR A BOULETS</b> (Vue de face)	Echelle :	Ets ESPA
		Nombre :01	
		Date :	P. 21



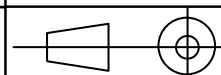
Figure

**BROYEUR  
A BOULETS**  
(Vue de profil)

*Echelle :*

*Ets ESPA*

*Nombre :01*



*Date :*

*P. 22*

15	Moteur 0.5Ch 998 tr/min		01	
14	Poulie menante(moteur)	Acier A50 060	01	
13	Interrupteur		01	
12	Boulons de fixation M8 X30	Acier XC 38 040	08	
11	Axe rouleau	Acier XC 38 040	02	
10	Poulie menée	Acier A 50 0110	01	
09	Courroie Trapézoïdale 9X5		01	
08	Vis à oreille M6		03	
07	Couvercle	TPN 10mm	01	
06	Corps du broyeur	Tube Ø 120	01	
05	Roulement à billes SKF	042 X 020 X12	04	
04	Bout d'axe	Acier XC 38 040	02	1
03	Palier		04	
02	Rouleau d'entraînement	Tuyau PVC Ø30	02	
01	Bâti	Cornière	01	
Rép	Désignation	Matière	Nbre	Observation
<b>BROYEUR A BOULETS</b>				Date
				Dessinateur : RADO
				N° 00

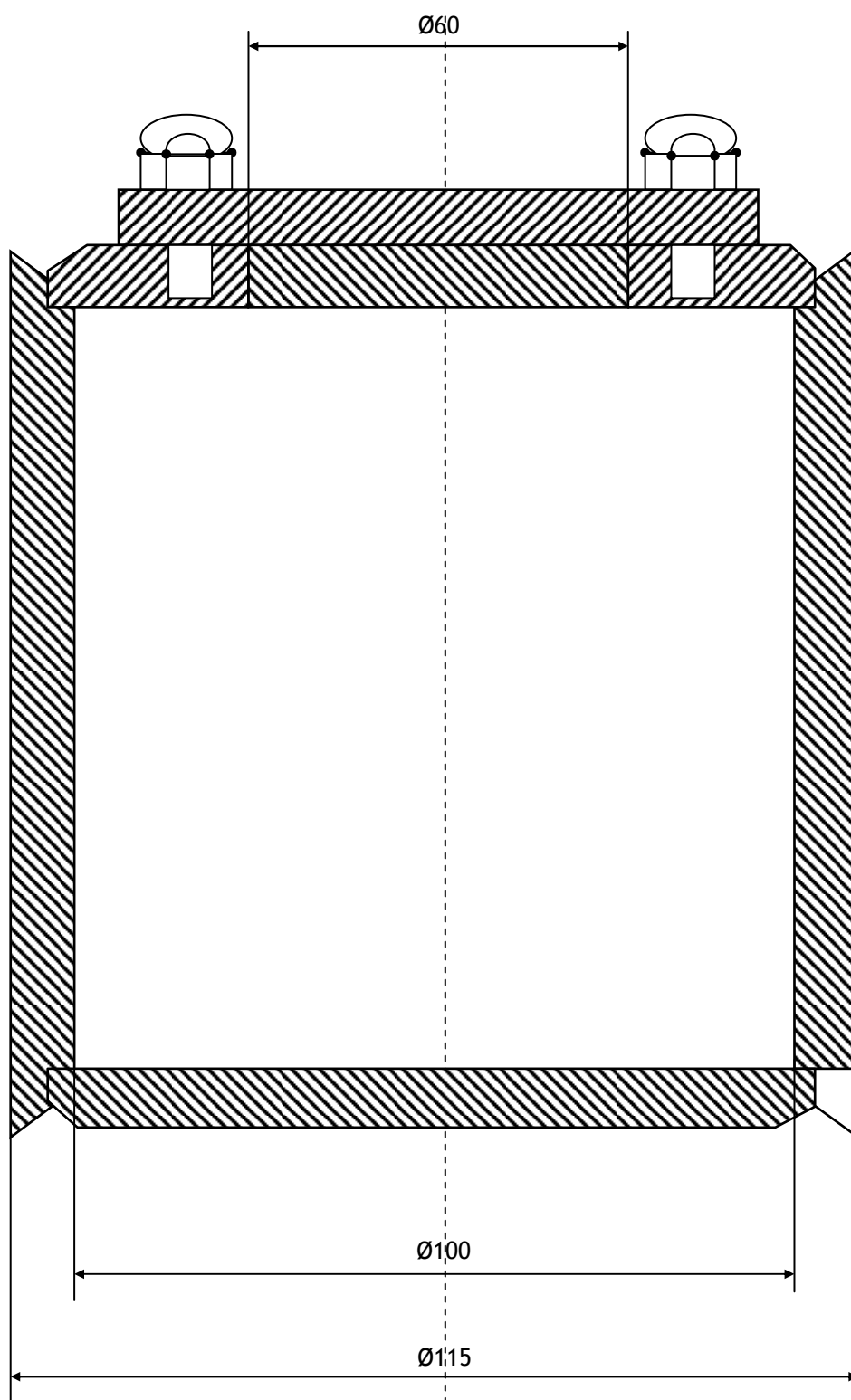
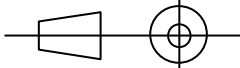
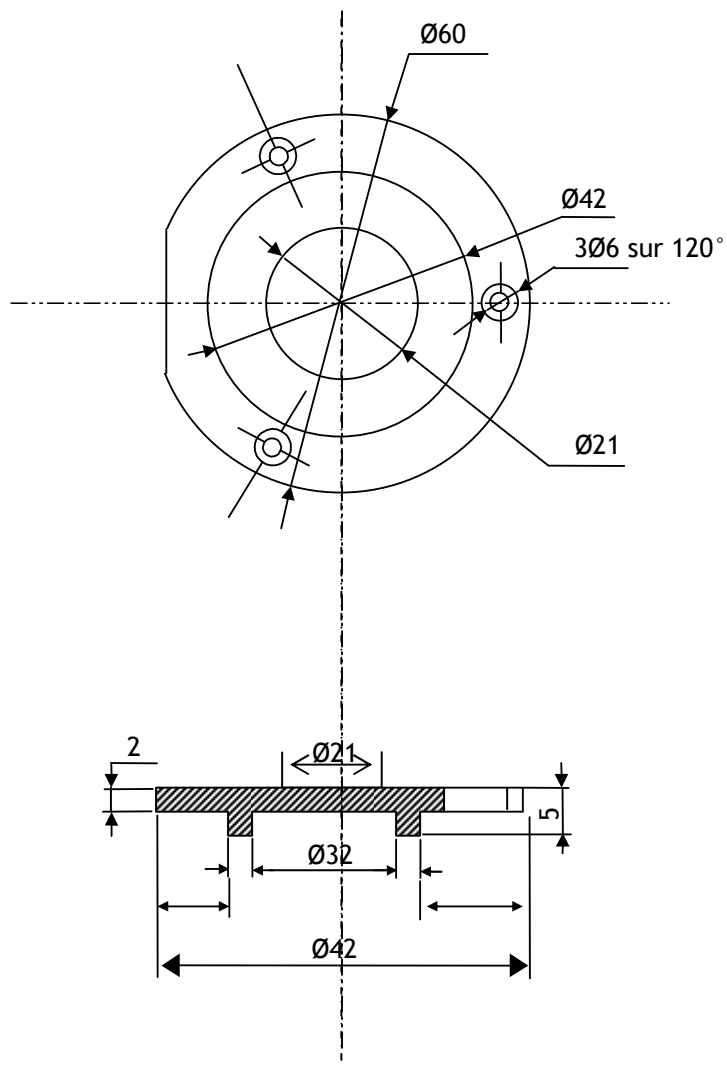
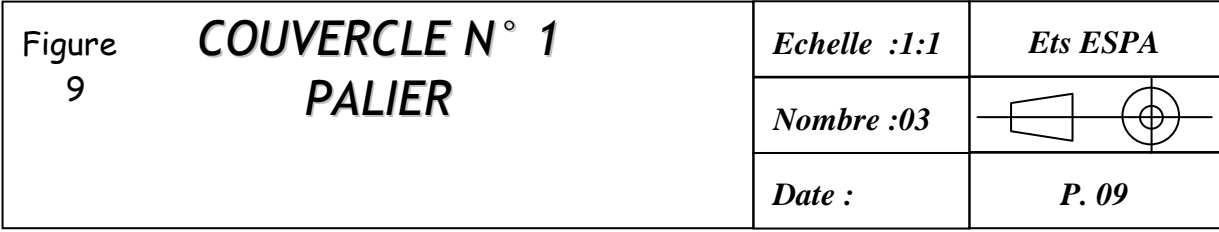


Figure 7	<b>CORPS DU BROYEUR</b> (Ensemble)	Echelle :1:1	Ets ESPA
		Nombre :01	
		Date :	P. 11



<p>Figure 8</p> <p><b>COUVERCLE N° 2</b></p> <p><b>PALIER</b></p> <p>(Au niveau poulie menante)</p>	<i>Echelle :1:1</i>	<i>Ets ESPA</i>
	<i>Nombre :01</i>	
	<i>Date :</i>	<i>P. 10</i>





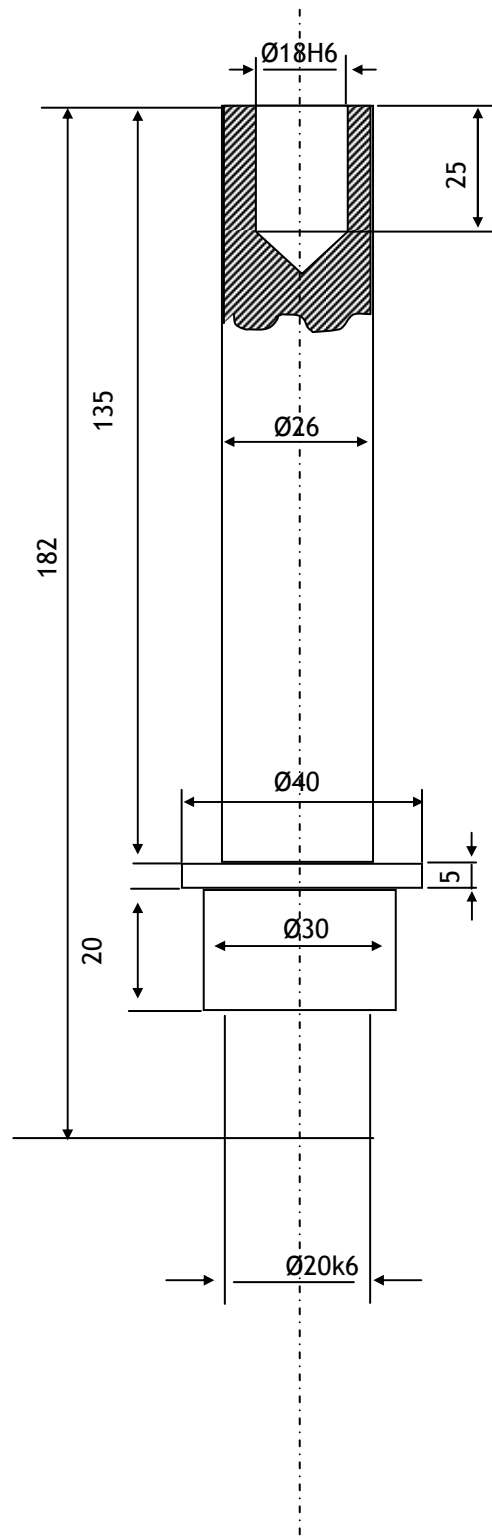


Figure 10	<b>AXE ROUE LIBRE</b>	<i>Echelle :1:1</i>	<i>Ets ESPA</i>
		<i>Nombre :01</i>	
		<i>Date :</i>	<i>P. 08</i>

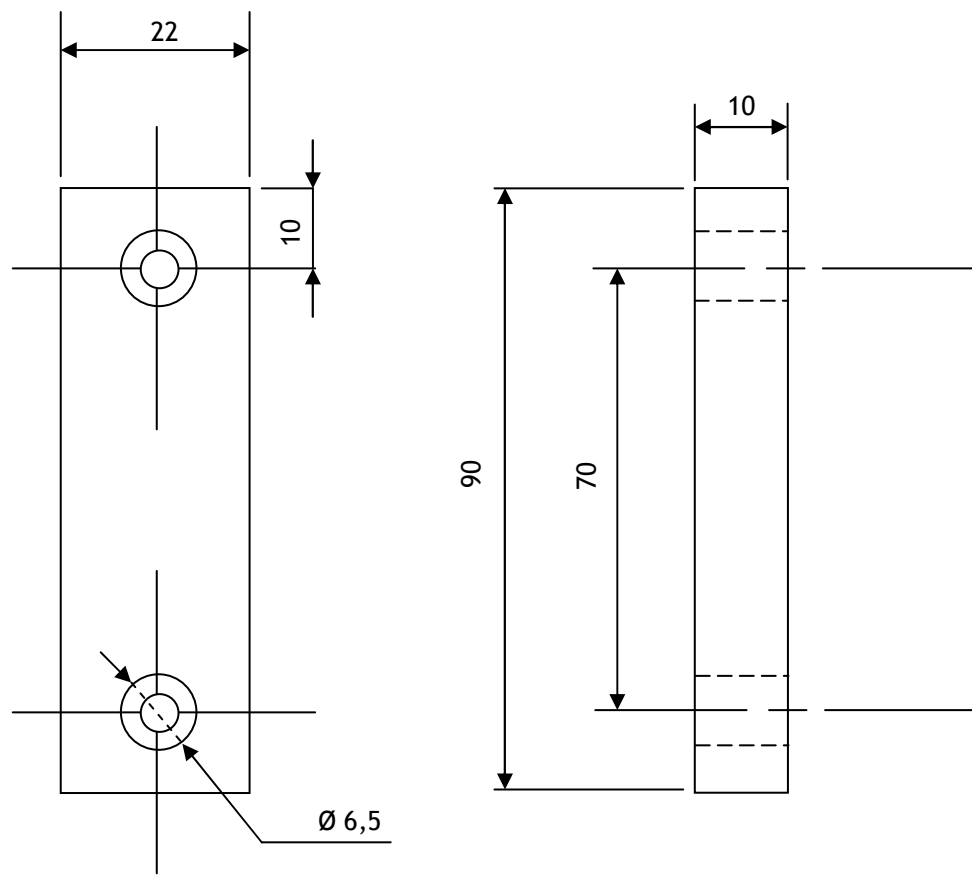


Figure 11	<b>SUPPORT - PALLIER</b>	<i>Echelle :1:1</i>	<i>Ets ESPA</i>
		<i>Nombre :04</i>	
		<i>Date :</i>	<i>P. 07</i>

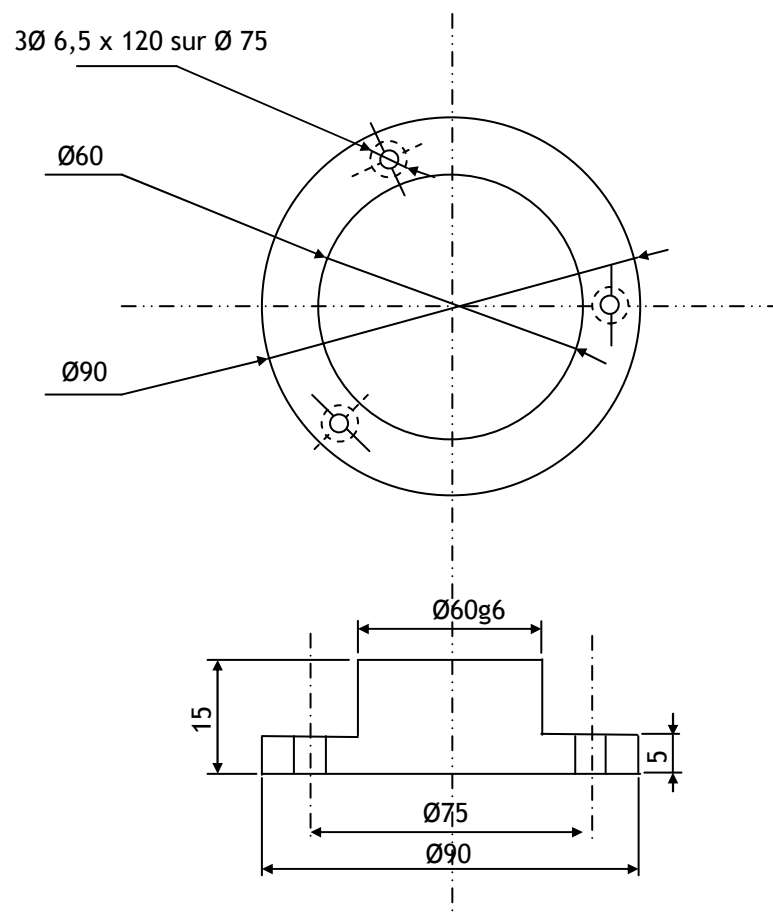
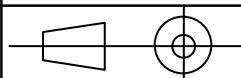


Figure 12	<b>COUVERCLE BROYEUR</b>	<i>Echelle :1:1</i>	<i>Ets ESPA</i>
		<i>Nombre :01</i>	
		<i>Date :</i>	<i>P. 06</i>

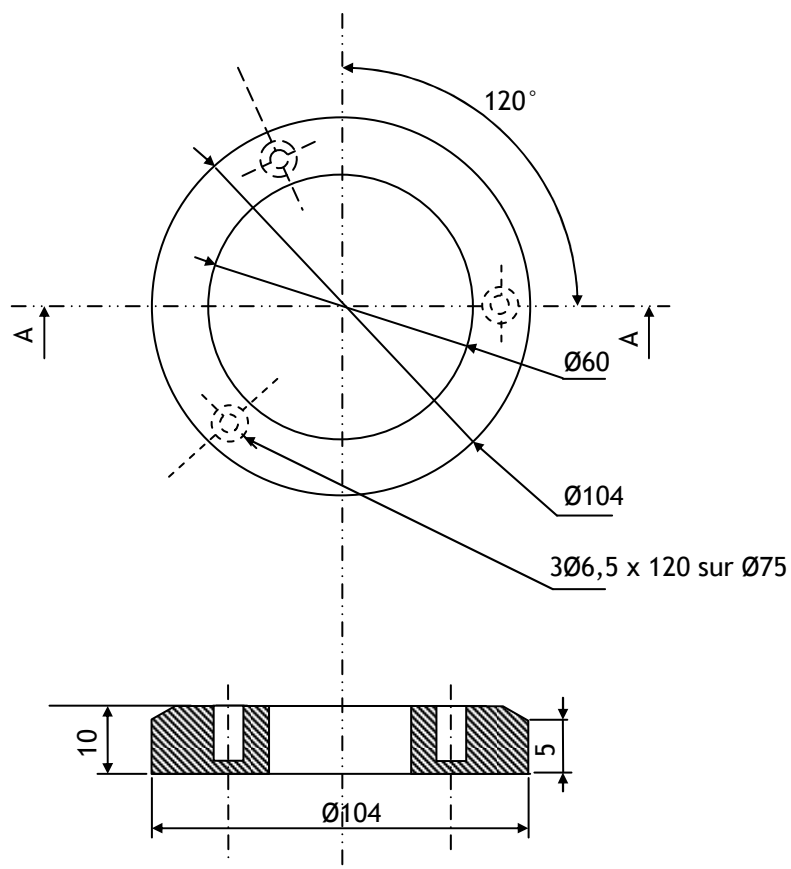


Figure 13	<b>COUVERCLE COURRONE</b>	<i>Echelle :1:1</i>	<i>Ets ESPA</i>
		<i>Nombre :01</i>	
		<i>Date :</i>	<i>P. 05</i>

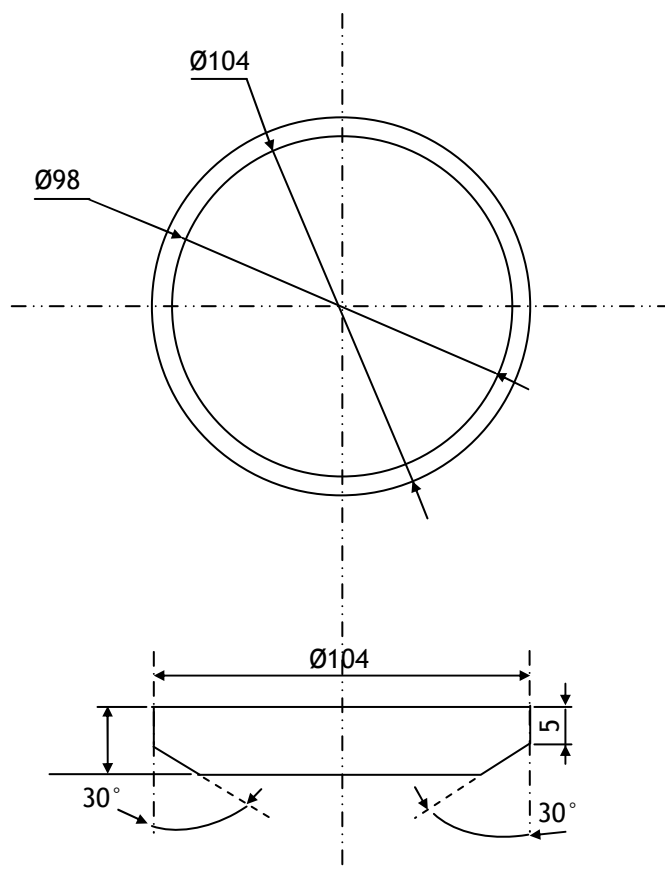
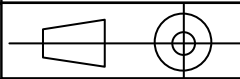


Figure 14	<b>COUVERCLE FIXE</b>	<i>Echelle :1:1</i>	<i>Ets ESPA</i>
		<i>Nombre :01</i>	
		<i>Date :</i>	<i>P. 04</i>

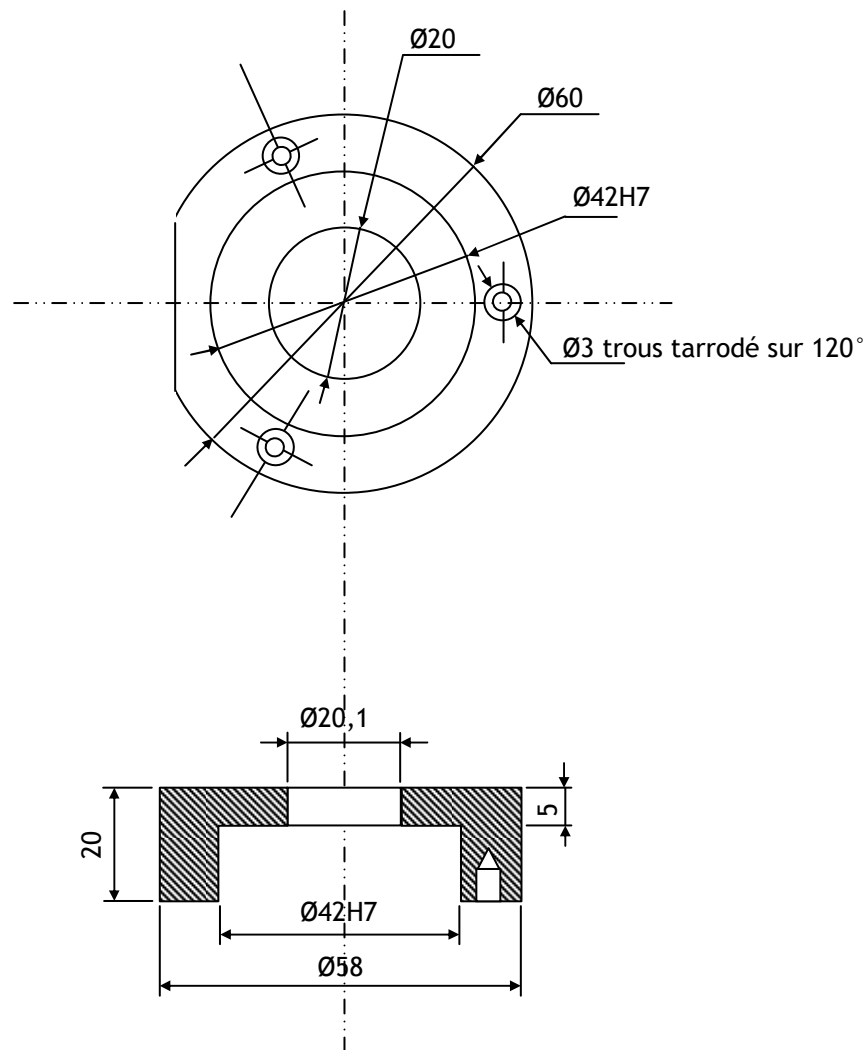


Figure 15 <b>CORPS PALIER</b> (Au niveau poulie menante)	Echelle :1:1	Ets ESPA
	Nombre :04	
	Date :	P. 03

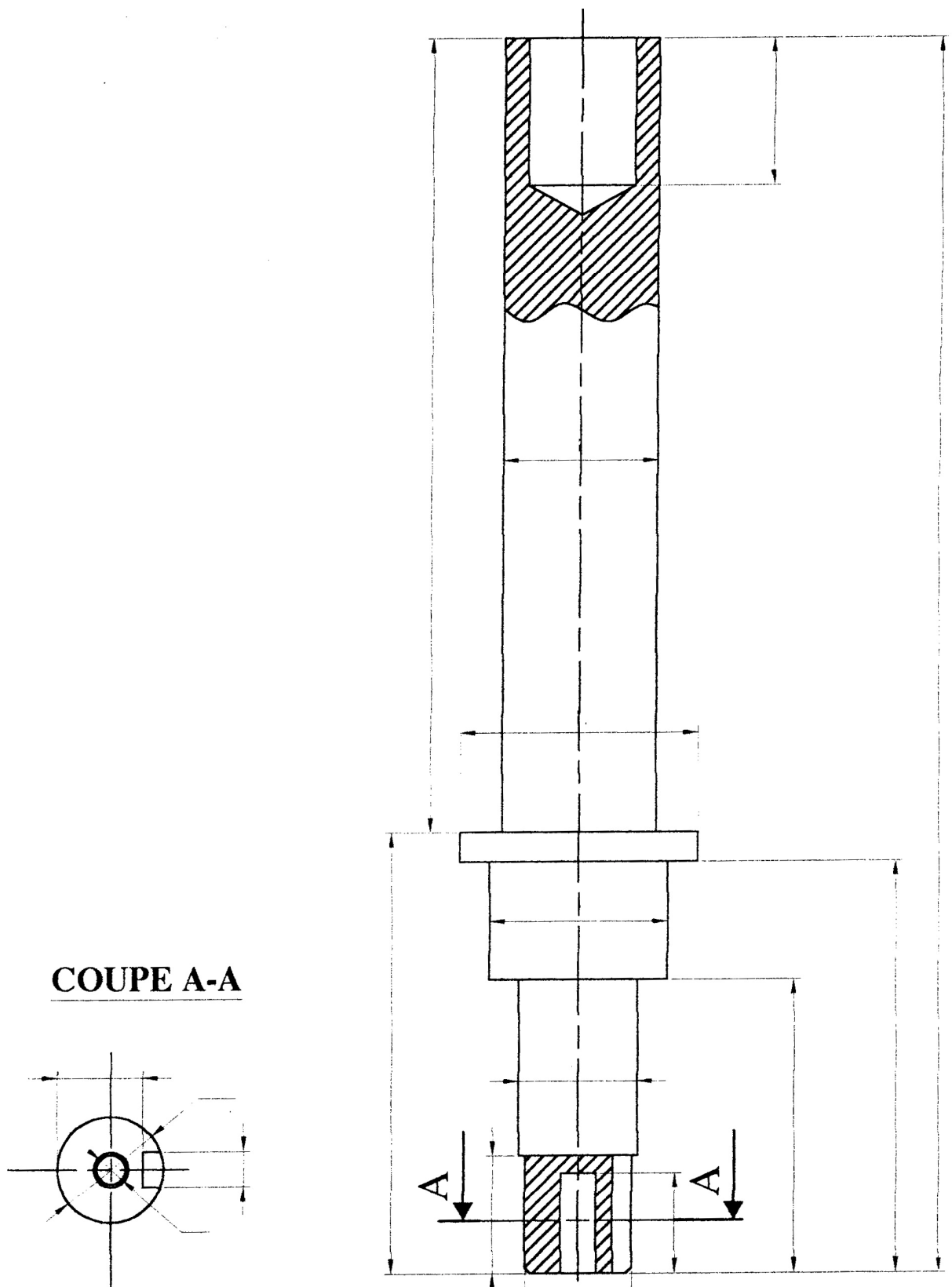


Figure 16	<b>AXE AU NIVEAU DE LA POULIE</b>	<i>Echelle :1:1</i>	<i>Ets ESPA</i>
		<i>Nombre :01</i>	
		<i>Date :</i>	<i>P. 02</i>

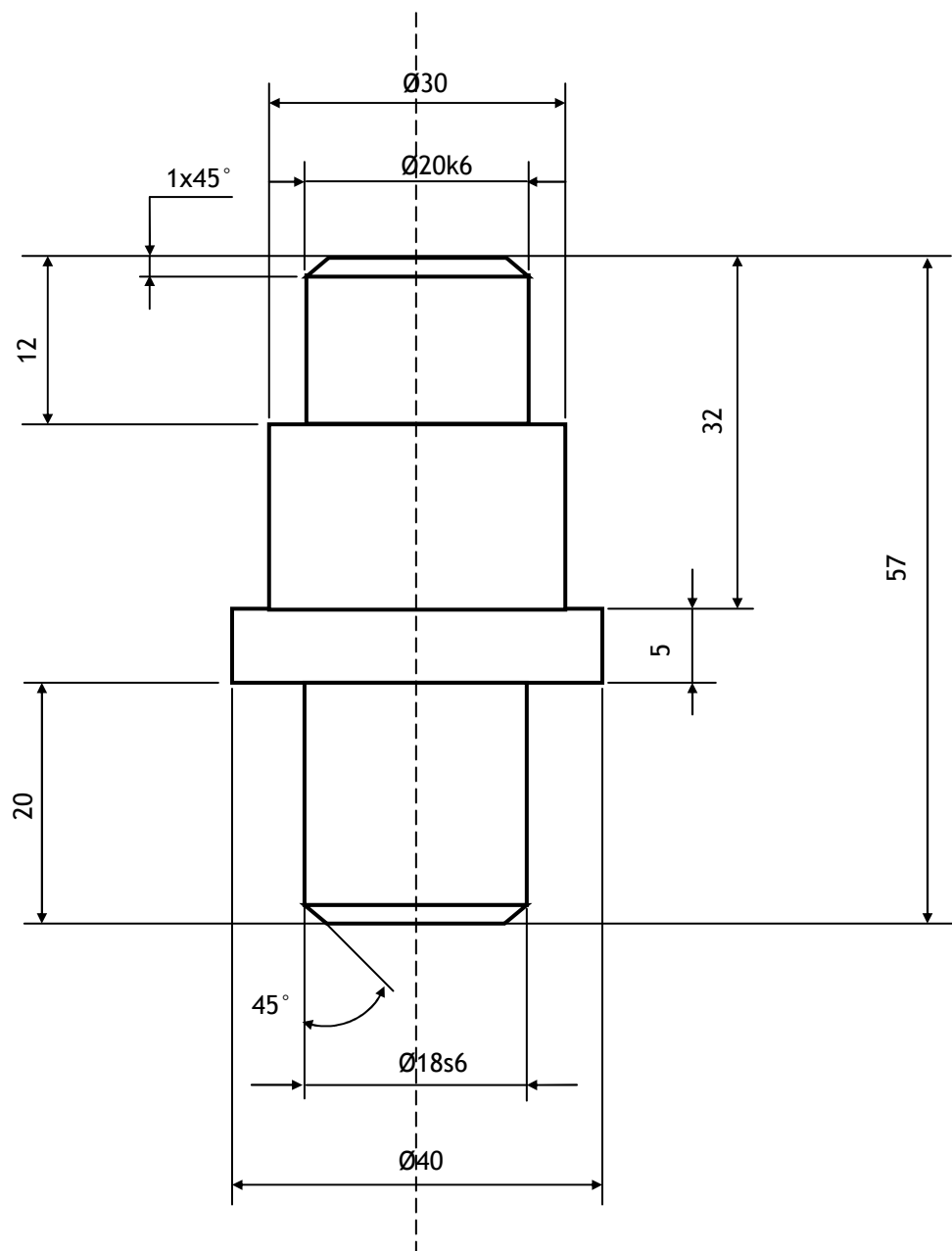
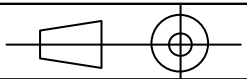


Figure 17	<b>BOUT D'AXE</b>	<i>Echelle :1:1</i>	<i>Ets ESPA</i>
		<i>Nombre :02</i>	
		<i>Date :</i>	<i>P. 01</i>



Désignation	Matière et dimension	Quantité	Prix unitaire (FMG)	Montant (FMG)
Plaque support palier	Fer plat 25 x 10 L = 100 mm	4	14 215	56 860
Bâti et accessoire de soudage et peintures	Cornière L25 x 25 L = 4 m		226 300	226 300
Poulie menée	Accessoires	1	108 000	108 000
Poulie menante		1	116 080	116 080
Couvercle - palier	A <sub>50</sub> $\phi_{60}$ L = 10	1	50 770	203 080
Axe n° 1	A <sub>50</sub> $\phi_{100}$ L = 20	1	99 135	99 135
Couvercle broyeur	A <sub>50</sub> $\phi_{40}$ L = 200	1	65 935	95 935
Couvercle - fixe	A <sub>50</sub> $\phi_{120}$ L = 15	1	33 320	33 320
Couvercle couronne i	A <sub>50</sub> $\phi_{120}$ L = 15	1	72 920	72 920
corps - palier	A <sub>50</sub> $\phi_{60}$ L = 25	4	59 675	238 700
Axe n°2	A <sub>50</sub> $\phi_{40}$ L = 215		101 980	101 980
Bout d'axe	A <sub>50</sub> $\phi_{40}$ L = 60	2	32 980	65 960
Moteur	0.5ch/440V/380V	1	400 000	400 000
Courroie	9 x 7 x 5 mm	1	15 000	15 000

trapézoïdal	L = 910mm A = 34°			
Roulement à billes	SKF, réf. 6004	4	15 000	60 000
Vis	M8	6	500	300
Vis	M6	11	4 000	44 000
Bille	φ 2,7, acier dur	20	4 000	80 000
Corps tubulaire	φ 100 x 1 10	1	25 000	25 000
Divers				625 000
<b>TOTAL</b>				<b>2 600 670</b>

*Arrêté le présent devis à la somme de deux millions six cent mille six cent soixante dix francs malgache.*

# **PARTIE III**

## **ESSAIS**

### **EXPERIMENTAUX**

## **PARTIE III**

### **ESSAIS EXPERIMENTAUX**

#### **I. GENERALITES**

Cette partie consiste à caractériser la performance et le mode d'emploi de l'appareil, nous avons fait des essais de broyage sur un échantillon de calcaire dur.

##### ***1.1. Mise en marche de la machine et précautions. [2]***

Pour le meilleur fonctionnement de l'appareil, nous adoptons les précautions suivantes avant son utilisation.

1. Vérifier que le branchement électrique soit fonctionnel:
  - Si le courant est alimenté en 220 V, on doit brancher avec le moteur un condensateur de démarrage de 16 $\mu$ F
  - Si le courant est alimenté en 380 V triphasé, on doit vérifier la polarité du branchement (car ceci est relationnel avec le sens de rotation de polarité).
2. Vérifier la netteté intérieure du corps pour garder la pureté du produit à broyer,
3. Vérifier l'horizontalité de la plate-forme supérieure du broyeur.
4. Vérifier la position « OFF » ou position « Zéro » du contacteur avant la mise en marche,
5. Vérifier le verrouillage de couvercle du broyeur en serrant les 3 verrous, après avoir introduit les charges (boulets et produit),
6. Il est conseillé de vérifier la stabilité de la machine pour éviter la perturbation due à la vibration du moteur.

##### ***1.2. Protection de l'environnement***

Concernant la protection de l'environnement, il est nécessaire de suivre quelques détails ci-dessous:

1. Eliminer le plus possible le dégagement des poussières avant et après le broyage: nettoyer systématiquement le corps et les boulets.

2. Le système est conçu pour réduire les bruits issus du moteur et les ronronnements des charges.
3. Vérifier toutes connections et les fils usés pour éviter l'origine les court – circuits

## **II. ESSAI DE BROyage**

### ***II.1. Objet de l'essai***

L'essai consiste à faire varier surtout les paramètres ayant une influence sur l'appareil, (vitesse de rotation, taux de changement, dimension des boulets, temps de Broyage, dimension des produits  $D_{80}$ )

### ***II. 2. Méthode***

Les principales opérations sont:

- Le broyage,
- Le chronométrage du temps de broyage,
- Analyse des produits broyés: Pesage et analyse granulométrique.
- Vérification de la fidélité de l'appareil,
- Vérification des résultats obtenus,

### ***II. 3. Appareillage***

On a besoin comme appareils:

- Balance de précision,
- Tamis normalises + fond de tamis ou PAN
- Matériels de laboratoire : tubes, balance de précision, ...

### ***II.4. Expérience:***

L'expérience a été effectuée en faisant varier les paramètres inhérents cités précédemment. Pour cela nous avons choisi comme valeur de  $D_p = 8 \text{ mm}$ , car  $D_p$  doit être inférieur au diamètre des boulets. Les tamis utilisés correspondent à des ouvertures variant de 8mm à 80u, pour l'analyse granulométrie. Le temps de broyage optimal est varié de 15 à 40 mn selon le besoin en finesse du produit.

Nous avons les caractéristiques du calcaire :

Dureté = 4,5 à 5,2 à l'échelle de Mohs

Densité = 3.5

Work Index:  $W_i = 12, 54 \text{ KVVh/St}$

### ***II.5. Résultats***

Après avoir effectué le broyage de l'échantillon, nous avons obtenu une poudre sombre. On évite les pertes entraînent la différence de poids de notre produit initiales et finales

## **III. ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

### ***III.1. Généralités***

L'analyse granulométrique a pour but de définir la distribution en niasse de l'ensemble des particules suivant la granulométrie des particules de ce lot.

Cette analyse a été effectuée en laboratoire à l'aide d'une série de tamis. Les Tamis sont disposées par ordre croissant de diamètre des trous ou encore par ordre décroissant du diamètre de mesh/inch du sommet vers le bas.

Soit M la masse totale de l'échantillon et mi la masse des refus respectivement pour chaque tamis

y le pourcentage des refus du tamis

x le pourcentage des passés du tamis

$$y[\%] = \frac{\text{Masse de refus du tamis}}{\text{Masse de passé du tamis}} \text{ ---} \times 100$$

$$x[\%] = \frac{\text{Masse de passé du tamis}}{\text{Masse totale du lot de particules}} \text{ ---} \times 100$$

### ***III. 2. Courbe granulométrique***

La loi de répartition  $y = f(D_p)$  ou  $x = f(D_p)$  est le résultat de l'analyse granulométrique. Chaque courbe représentative est appelée «courbe granulométrique ».

On adopte dans l'analyse granulométrique la règle suivante:

$a_i$  : ouverture de maille du tamis de rang i

$a_{i-1}$ : ouverture de maille du tamis de rang (i-1), placé immédiatement au dessus du tamis de rang i

Les particules de refus du tamis de rang i sont supposées de même taille de valeur

$$D_{pi} = \frac{a_i + a_{i-1}}{2}$$

### **III.3. Analyse granulométrique du lot de l'échantillon**

#### *III. 3.1. Procédure*

On superpose les tamis respectivement d'ouvertures  $D_p = 8\text{mm}$  à l'ouverture  $0,08\text{mm}$ ). En dessous de cette série de tamis, on doit avoir un cuve de récupération (appelé PAN) ou on y récupère les passes du tamis de l'ouverture  $0.08\text{mm}$ .

On pèse les refus respectivement de chaque tamis en utilisant une balance de précision. On obtient  $m_i$  la masse correspondant au tamis de rang i, ainsi  $y_{\text{refus}} [\%]$

On marque les points d'intersection de chaque ouverture de maille (ou  $D_p$ ) et son  $Y_{\text{refus}}$ -

On relie tous ces points en une forme de courbe, et on obtient la courbe granulométrique de notre analyse.

Cette courbe est la courbe représentative de la fonction

$$y_{\text{refus}} [\%] = f(D_p)$$

Mais dans notre analyse, nous essayons de construire la courbe représentée par la relation

$$Y_{\text{refus}} \text{ cumulées } [\%] = f(D_p)$$

où

$$\overline{D_p} = \frac{a_i + a_{i-1}}{2}$$

Remarques:

Remarquons que l'ouverture de la maille de tamis utilisé pour cette analyse est de forme carré de côté a. On parle de la sédimentométrie, l'analyse qui définit la distribution de masse de l'ensemble des particules suivant la granulométrie des particules de ce lot, mais l'ouverture des mailles (ou  $D_p$ ) du tamis est inférieure à  $0,08\text{mm}$ .

Les tableaux suivants résument les résultats de l'analyse.

Soit  $t_i$  le temps de broyage  $i = (1, 2, 3, 4)$

M = 1200 g Pour t1 = 40 mn

Rang du tamis	Ouverture de tamis ai [mm]	Masse des refus mi [g]	Y <sub>refus</sub> [%]	Y <sub>refus</sub> cumulés [%]
1	20	0	0	0
2	10	24	2	2
3	5	12	1	3
4	2	24	2	5
5	1	60	5	10
6	0.5	84	7	17
7	0.2	276	23	40
8	0,1	204	17	57
9	0.08	12	1	58
PAN	< 0,08	504	42%	

**Tableau n°3** : Analyse granulométrique t1=40 mn

Pour t2=30mn M = 1200 g

Rang du tamis	Ouverture de tamis Ai [mm]	Masse des refus Mi [g]	Y <sub>refus</sub> [%]	Y <sub>refus</sub> cumulés l%]
1	20	0	0	0
2	10	108	9	9
3	5	108	9	18
4	2	72	6	26
5	1	108	9	35
6	0,5	156	13	48
7	0.2	144	12	60
8	0,1	48	4	64
9	0,08	12	1	65
PAN	< 0,08	420	35%	

**Tableau n° 4** : Analyse granulométrique pour t2 = 30mn

Pour t3=25mm et M = 1200g



Rang du tamis	Ouverture de tamis Ai [mm]	Masse des refus Mi [g]	Y <sub>refus</sub> [%]	Y <sub>refus</sub> cumulés l%]
1	20	0	0	0
2	10	144	12	12
3	5	204	17	29
4	2	132	11	40
5	1	180	15	55
6	0,5	180	15	70
7	0,2	144	12	82
8	0,1	36	3	85
9	0.08	24	2	87
PAN	< 0,08	156	13%	

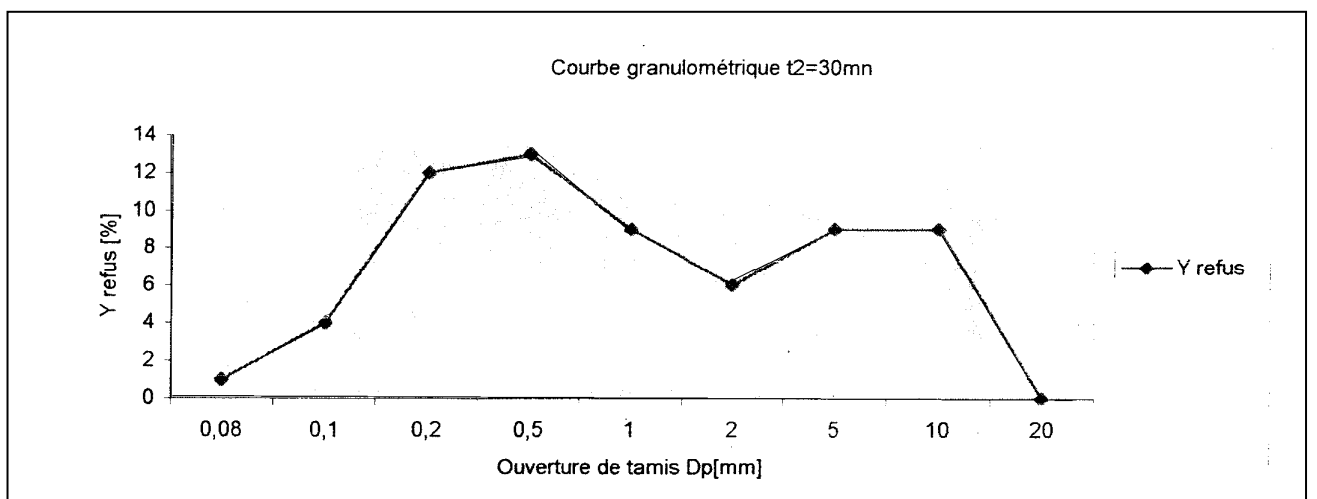
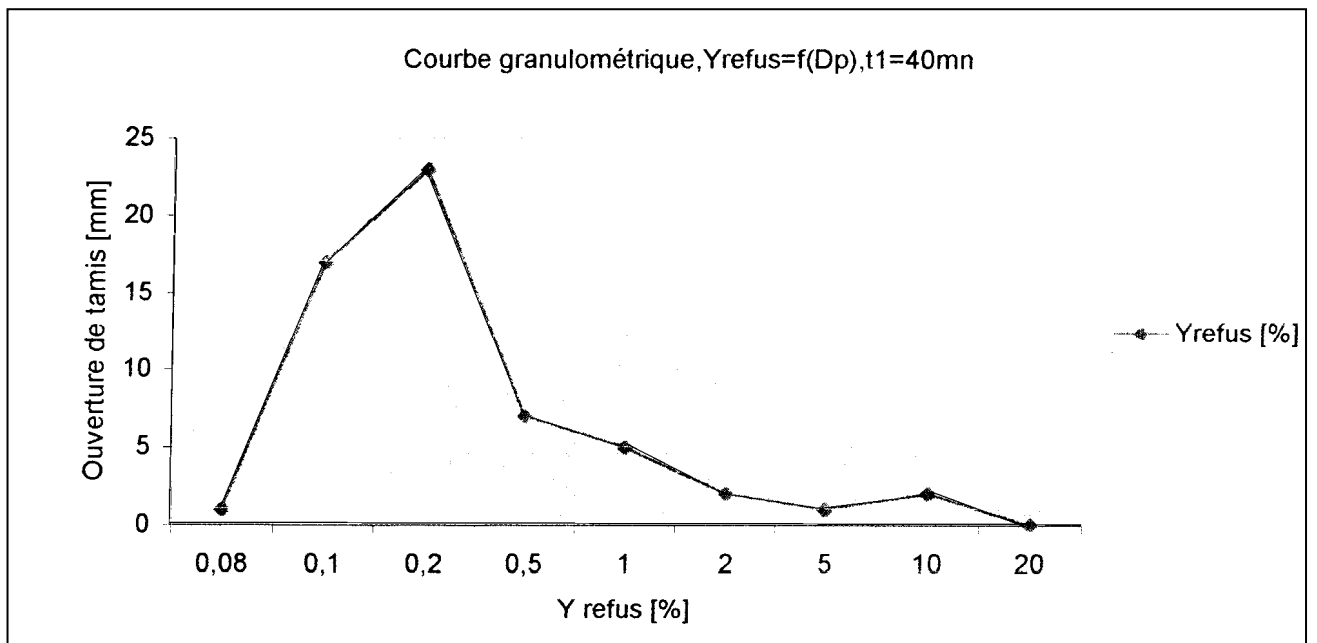
**Tableau n° 5** : Analyse granulométrique (t<sub>3</sub> =40 mn)

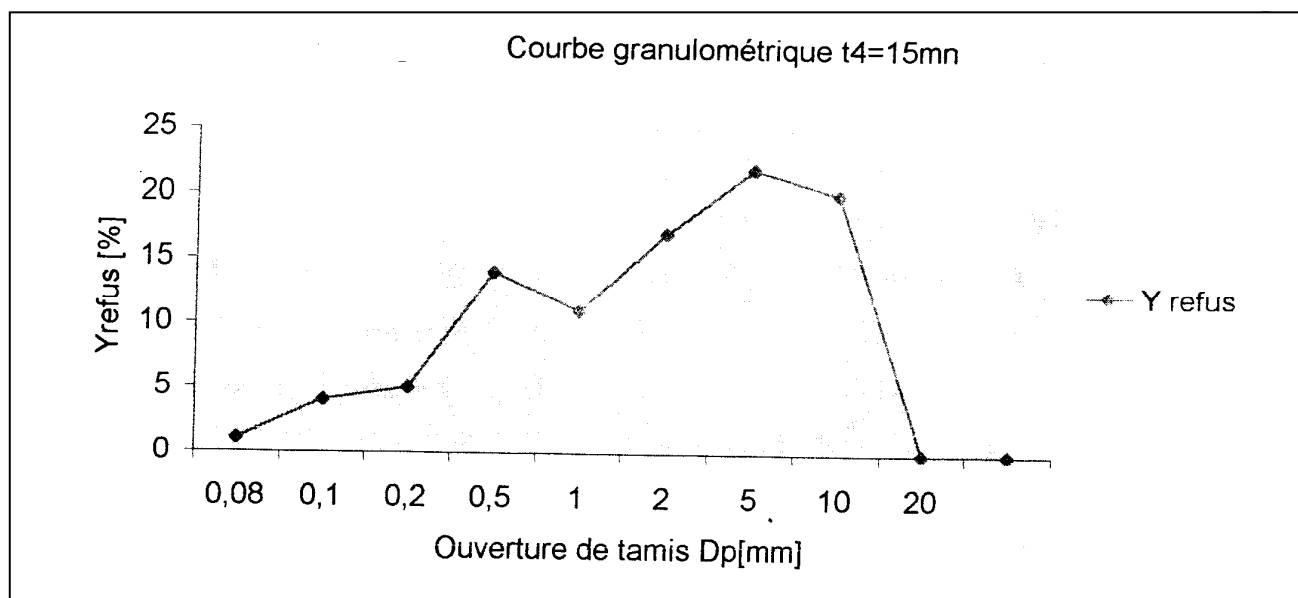
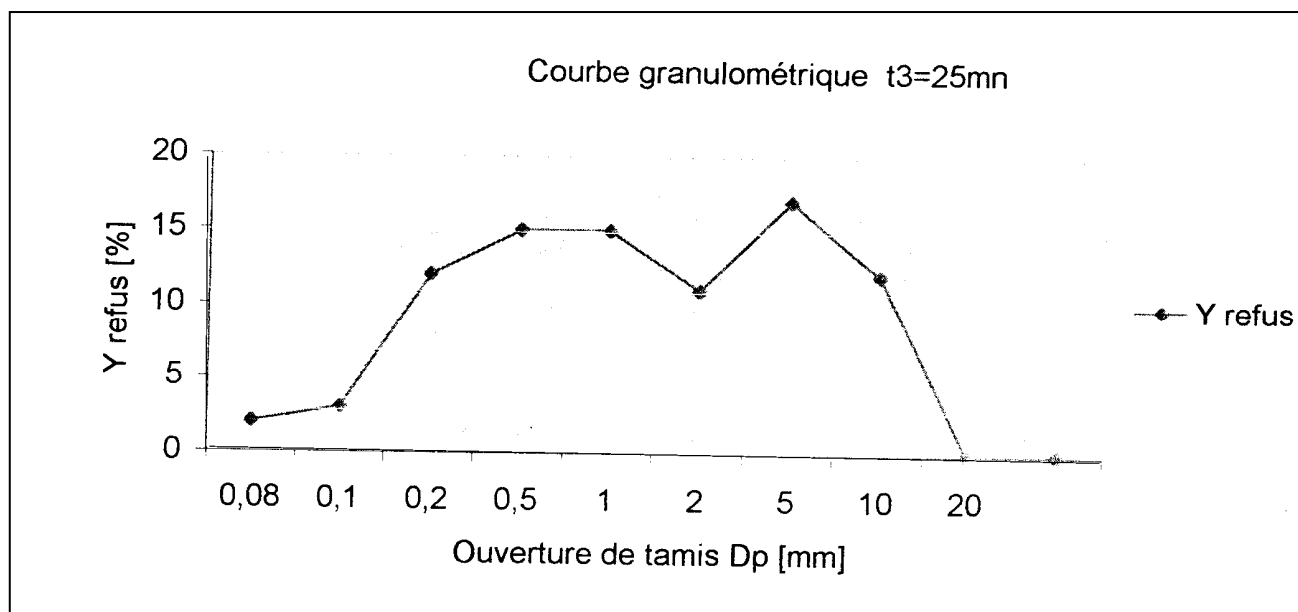
Pour t<sub>4</sub>=15.mm

M = 120 g

Rang du tamis	Ouverture de tamis Ai [mm]	Masse des refus Mi [g]	Y <sub>refus</sub> [%]	Y <sub>refus</sub> cumulés l%]
1	20	0	0	0
2	10	240	20	20
3	5	264	22	42
4	2	204	17	59
5	1	132	11	70
6	0,5	168	14	84
7	0,2	60	5	89
8	0.1	48	4	93
9	0.08	12	1	94
PAN	< 0,08	72		

Les courbes suivantes représentent les courbes granulométriques de 4 lots d'échantillons. Ces lots broyés pendant quatre durées de broyage différentes ont la même masse ( $M = 1200\text{g}$ ):  $t_1 = 40\text{mn}$ ,  $t_2 = 35\text{mn}$ ,  $t_3 = 25\text{mn}$ ,  $t_4 = 15\text{mn}$





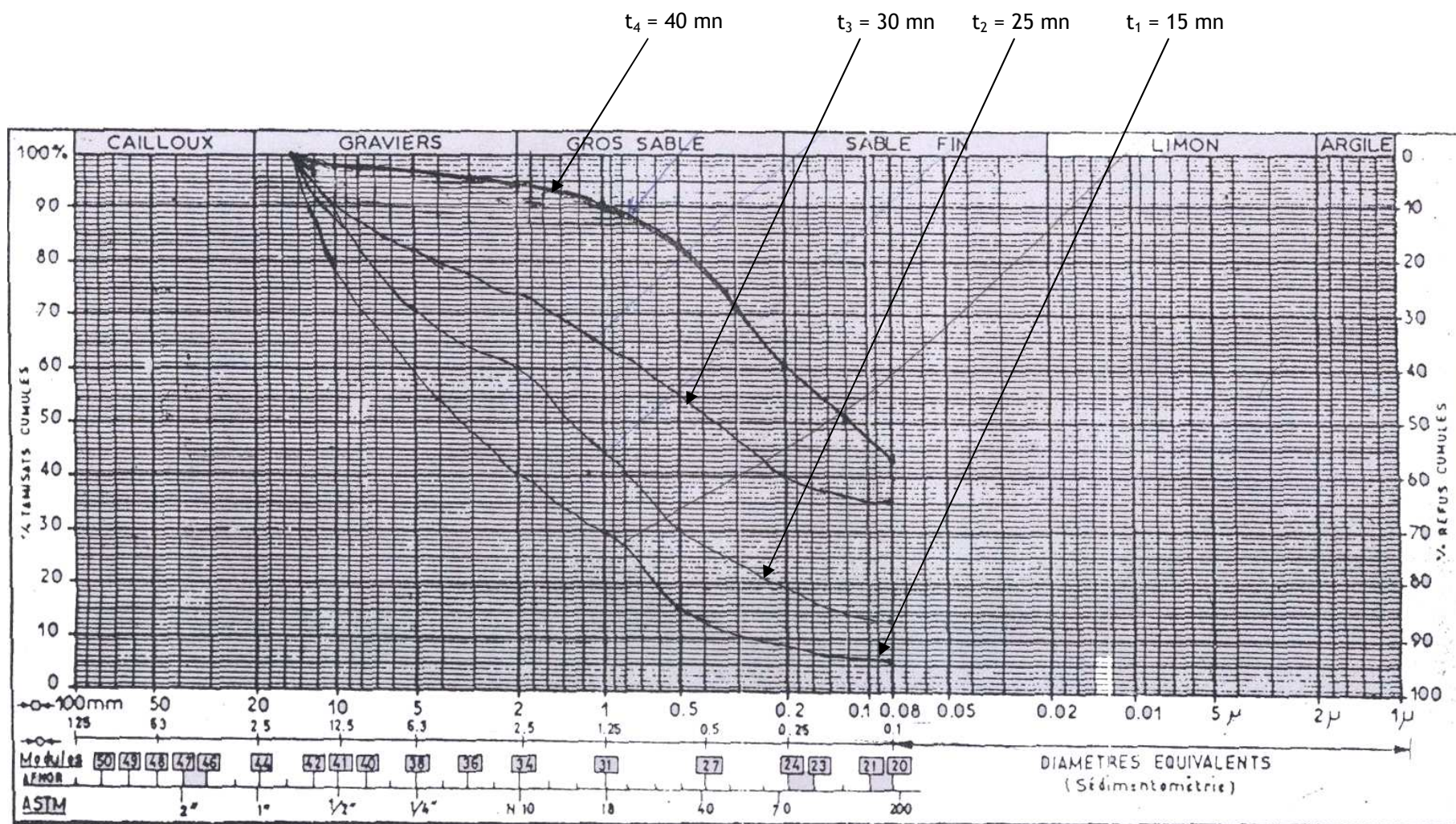


Figure 22 : Courbes granulométriques :  $Y_{\text{réfus cumulés}} [\%] = f[D_p]$

### III. 4 Interprétation :

On observe dans ces tableaux une hausse spontanée de la quantité du refus;

- Sur le tableau n°3 (correspondant à  $t_1=40mn$ ), ce refus atteint de 23% : % sur le tamis de rang n°7. 200 $\mu$
- Sur le tableau n°4 (correspondant à  $t_2 = 30mn$ ), ce refus atteint de 13% : % sur le tamis de rang n°6. 500  $\mu$
- Sur le tableau n°5 (correspondant à  $t_3 = 25mn$ ), ce refus atteint de 17% : % sur le tamis de rang n°3 5mm
- Sur le tableau n°6 (correspondant à  $t_4 = 15mn$ ), ce refus atteint de 22% : % sur le tamis de rang n°3 5mm

Ces «pics» correspondent aux particules des  $D_p$  représentatif de l'échantillon. Ainsi, on remarque que les courbes représentées par la relation

$Y_{\text{refus cumulés}}[\%] = f(D_p)$  sont décroissantes en fonction de l'ouverture de tamis.

Pour conclure ces résultats de tamisage et la performance de notre broyeur, nous nous référons à ce qu'on appelle finesse de broyage.

Fréquemment, on convient de définir la finesse de broyage des minerais par un seul chiffre qui est en pratique, l'ouverture de la maille du tamis sur lequel la proportion est  $r = 5\%$  (en poids) c'est à dire la finesse de broyage est donc l'ouverture du tamis qui laisse passer 5%.

Elle définit la limite inférieure concernant la granulométrie de l'échantillon à étudier.

En effet, il n'existe pas d'intérêt à broyer plus qu'il n'est strictement nécessaire d'une part le broyage est une des opérations la plus coûteuse et d'autre part, un broyage trop poussé produit une très grande quantité de grains ultrafins dont le traitement se fait très difficilement et avec des mauvais rendements, c'est ce qu'il a convenu d'entraîner le surbroyage.

Dans ces courbes granulométriques ( $y_{\text{retus}}[\%] = f(D_p)$ ), elles nous montrent que les broyages effectués pendant quatre temps différents sont rentables

- Les pourcentages des  $y_{\text{refus}}$  sont inférieurs à 5%, pour la courbe représentée par  $y_{\text{refus}} = f(D_p)$  correspondant à  $t_1 = 40\text{mn}$ .  $D_p = 0,2\text{mm}$  correspond le lot représentatif de l'échantillon.

- Pour la courbe correspond à  $t_2 = 30\text{mn}$ , le  $D_p = 0,5\text{mm}$  correspondant à  $y_{\text{refus}} = 13\%$  est le lot représentatif de l'échantillon.

- La courbe correspondant à  $t_3 = 25\text{mn}$ , le  $D_p = 5\text{mm}$  correspond à  $y_{\text{refus}} = 17\%$  est le lot représentatif.

De même pour la courbe correspondant à  $t_4 = 15\text{mn}$ ,  $D_p = 5\text{mm}$  qui atteint le  $y_{\text{refus}} = 22\%$

## CONCLUSION

Au terme de cette étude, diverses idées peuvent être mises en relief, nous nous limitons à mettre l'accent sur les points suivants.

D'un côté, nous avons appliqué la méthode de la mécanique générale. Elle est fondée sur la connaissance des matières premières existantes et leur traitement pour qu'elles soient transformées en pièces directement utilisables et durables. De plus, nous avons des usines destinées et aptes à confectionner ces pièces. De l'autre côté, les résultats effectués montrent la performance de la machine.

Etant satisfait de l'application du savoir-faire tout au long de notre formation au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, notre perspective d'avenir est d'élargir la création d'autres machines utilisables en laboratoire.

Il nous fallait faire des essais différents pour permettre d'établir un abaque d'utilisation. Mais malgré le temps et l'insuffisance des échantillons nous avons pris le calcaire comme base d'expérience.

De ce fait, il est nécessaire de continuer les études et les expériences afin d'améliorer l'utilisation de la machine.

En tant que telle, vue la grandeur de ce travail, il mériterait un appui financier de la part de notre établissement ou des décideurs.

Enfin cet ouvrage n'est pas une fin en soi, il est possible d'étendre la technique à adopter pour cette machine selon les besoins et la demande des usagers.

Nous espérons que cet ouvrage donnerait une satisfaction à ceux qui veulent développer cette étude à leur manière.



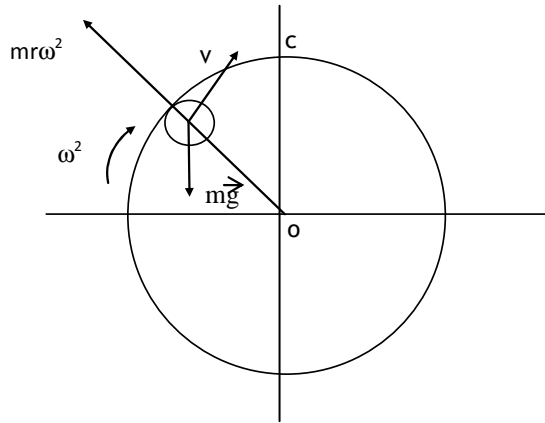
# ANNEXES

## ANNEXE 1

### A. 1. J. Détermination de la vitesse critique:

Pour la détermination de la vitesse critique, on doit considérer les conditions suivantes.

- Mouvement des boulets se font à un section droite du broyeur.
- On suppose que le boulet tourne autour de l'axe du broyeur sans glisser et sans rotation sur soi-même.
- Il n'y a pas de rebondissement sur le point de chute.



Au point C la résultante des forces d'inertie et de pesanteur n'a plus de composante radiale pour appliquer le boulet contre le parois du tambour.

Au point K,  $\alpha=0$   $\cos \alpha =1$ . On a une égalité entre force centrifuge et composante radiale du poids du boulet.

$$mg \cos \alpha = mR\omega^2$$

$$\alpha=0 \quad mg = mR\omega_c$$

$$\omega_c = \left( \frac{g}{R} \right)^{1/2}$$

$$\text{or } V_c = R\omega_c = (gR)^{1/2}$$

$$d'où \quad N_c = \left( \frac{30}{11} \right) \left( \frac{g}{R} \right)^{1/2}$$

En arrondissant, on obtient et en prenant:  $g=9,81$  USI

$$N_c = \frac{42,7}{D^{0,5}} \quad [A.1]$$

Avec D étant le diamètre intérieur du broyeur en mètre

$N_c$ , en tour par minute

### A. 1.2. Détermination de la vitesse pratique ou vitesse efficace:

Elle est déterminée par le produit de la vitesse critique et un coefficient pratique d'utilisation suivant la nature des corps broyants, appelé k

$$N_p \text{ ou } N_{\text{eff}} = k \times N_c \quad [\text{A.2}]$$

$N_p$  en (tr/mm)

k: coefficient adimensionnel, fixé à 0.75.

$$N_p = \frac{0,75 \times 42,7}{D^{0,5}}$$

$$N_p = \frac{32}{D^{0,5}}$$

### A. 1.3. Usure des corps broyants:

- L'usure des corps broyants due au frottement est donnée par deux relations:

$$dm = K_1 \times S \times dt \quad (1)$$

$$dm = K_2 \times S \times dD \quad (2)$$

Où m étant sa masse

t le temps d'utilisation

S sa surface extérieure.

$K_i$  est des constantes dépendantes de différentes paramètres du broyeur

Comme (1) = (2)  $K_1 \times S \times dt = K_2 \times S \times dD$

$$\int_0^1 dt = \frac{K_2}{K_1} \int_{D_0}^D dD$$

Comme  $D_0$  est le diamètre des boulets à l'instant t 0.

D est le diamètre à l'instant t.

Avec  $K_1 \times K_2 < 0$ , en posant et  $K = -K'$

On a  $(t - 0) = (K_1 - K_2) \times (D - D_0)$

t = x (D - D<sub>0</sub>)

$$D = D_0 - K_3 t \quad [A.3]$$

- L'usure des boulets due au choc est donnée par l'équation :

$$dm = -K_3 \times m \times dt \quad (3)$$

$$\int_{M_0}^M \frac{dm}{m} = -K_3 \times \int_{D_0}^1 dt$$

Pour  $t = 0$   $M_0$  est sa masse initiale

$M$  sa masse à l'instant  $t$ .

$$dm = -K_3 \times m \times dt$$

$$m = M_0 \times e^{-K_3 t}$$

$$(2) \quad dm = K_2 \times S \times dD$$

$$-K_3 \times m \times dt = K_2 \times dD \times S$$

$$\text{Or } m = \rho_B \left(\frac{4}{3}\right) \pi R^3 = \rho_B \left(\frac{4}{3}\right) \pi R^2 \left(\frac{D}{2}\right) = K \times S \times D$$

Avec  $\rho_B$  est la masse volumique du boulet.

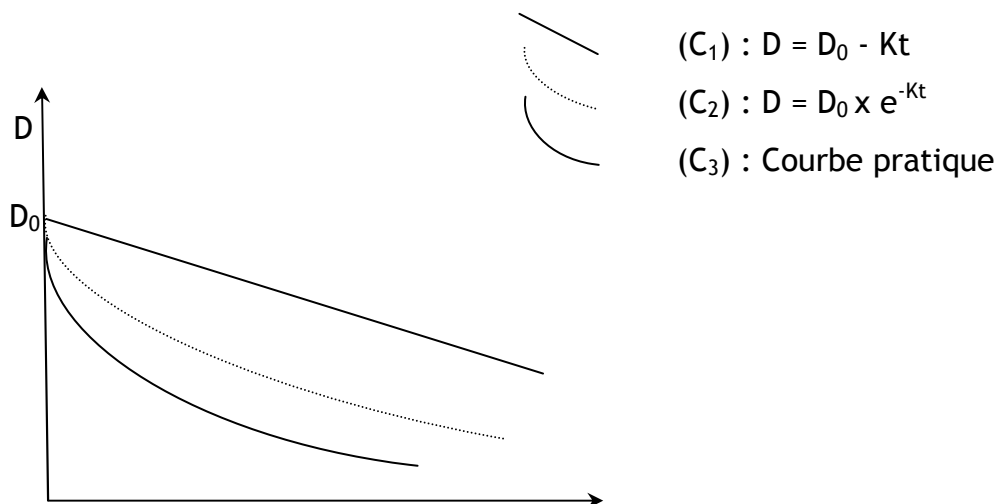
$S$  sa surface extérieure

$R$  sa rayon

$$\frac{dD}{D} = -K_4 dt$$

$$D = D_0 \times e^{-K_4 t} \quad [A.4]$$

D'après les formules [A3] et [A4], nous avons deux courbes représentant l'usure des corps broyants en fonction du temps que nous allons représenter



La courbe pratique résume l'usure des boulets en fonction du temps de l'utilisation du broyeur

## ANNEXE 2

### *Calcul de l'énergie de broyage - Formule Bond:*

$$\text{Soit } W_i = \frac{K}{\rho_s} \left[ \frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right] = \frac{K}{10\rho_s}$$

$$\text{Or } W_i = 10W_i \left[ \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right] [\text{kwh/st}]$$

$$W_i = \frac{10W_i}{0,907} \left[ \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right] [\text{kwh/st}] \quad [\text{A.5}]$$

L'énergie de Bond  $W_i$  est donné par un tableau appelé tableau de valeur des indices de Bond.  
Dans notre exemple, nous avons le calcite comme échantillon.

$$W_i = 12,54 \text{ kwh/st}$$

$\rho_s = 2,65$  est son poids spécifique.

### *Energie de Broyage du calcaire:*

$$\begin{aligned} \text{En prenant } D_{80} &= 8000 \mu\text{m} \\ d_{80} &= 80 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\text{On a } W = \frac{10 \times 12,54}{0,907} \left[ \frac{1}{\sqrt{80}} - \frac{1}{\sqrt{8000}} \right]$$

$$W = 13,9 \text{ kwh/t}$$

On alors en posant n ce rapport

$$\text{Entre } D_2 \text{ et } D_1, n_{2-1} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{153}{53}$$

$$n_{2-1} = 2,887$$

$$n_{4-3} = \frac{D_4}{D_3}$$

Entre  $D_3$  et  $D_4$

$$n_{4-3} = \frac{110}{35}$$

$$n_{4-3} = 3,14$$

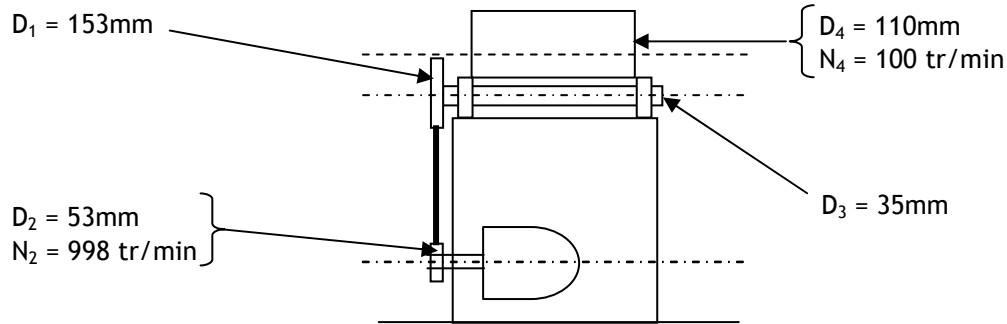
Comme entre  $D_2$  et  $D_3$ , on a la même vitesse de rotation. En généralisant, pour avoir le rapport de transmission entre le corps nous avons

$$n_{4-1} = n_{4-3} \times n_{2-1}$$

$$n_{4-1} = 9,07$$

## ANNEXE 3

### A3.1. Rapport des vitesses de rotation :



Soient  $D_A$  et  $D_B$  les diamètres des deux cylindres reliés (directs ou indirects) et  $N_A$  et  $N_B$  leurs vitesses de glissement du rotation respective, en tr/min. S'il n'y a pas de glissement du cylindre A sur B (ou de B sur A), la vitesse linéaire  $v$  d'un point situé à la périphérie des deux cylindres est la même.

En effet, nous pouvons écrire une relation

$$\text{Sur le cylindre A : } v = \frac{\pi \times D_A \times N_A}{60}$$

$$\text{Sur le cylindre B : } v = \frac{\pi \times D_B \times N_B}{60}$$

D'où l'on tire

$$D_A N_A = D_B N_B$$

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{D_B}{D_A} \quad [A6]$$

D'après cette relation que nous avons déterminé les dimensions des poulies et l'axe rouleau en connaissant la vitesse de rotation du moteur et le diamètre du broyeur

### A.3.2. Rapports de transmission :

Le rapport de transmission et le rapport de diamètre (ou rayon) de la poulie motrice et ce de la poulie menante.

## ANNEXE 4

### ***A.4.1. Conditions de montage des pièces :***

Deux conditions sont adoptées sur le montage des pièces :

- Alignement des appuis (Paliers)
- Laminage des axes ou des logements

Ajustement recommandé :

Montage à l'arbre tournant (Paliers et roulement)

- Sur les axes et les bouts d'axe
- Sur alésage des paliers

### ***A.4.2. Graissage des roulements :***

Le graissage sert à protéger le poli des organes contre les piquûres (c'est à dire des petits trous non débouchant) de rouille, et de réduire les frottements sur les chemins de roulements et sur crages intercalaires Accessoirement, il permet aux bagues glissantes de se placer correctement.

Base : Des huiles et des graisses consistantes.

### ***A.4.3. Protection :***

Elle consiste à éviter la poussière atmosphérique, les particules métalliques, les abrasifs, et la perte de lubrifiant.

## ANNEXE 5

### ***A. 5. Entraînement :***

Qui se compose :

- Le motoréduction (Moteur électrique)
- Transmission par courroie trapézoïdale crantée.

L'avantage de cette type de courroie est :

- a. Rendement de 95 % à 98%
- b. Elle peut fléchir en roulant sur de minimum de diamètre d'une poulie (Souple).
- c. Marche silencieuse.



Nombre de page : 58  
Nombre de figure : 22  
Nombre de tableaux : 06  
Nombre d'annexes : 05

## TITRE

# CONCEPTION ET REALISATION D'UN BROYEUR A BOULETS.

## RESUME

Le présent travail se rapporte à l'étude de la mise en œuvre l'un des matériels de fragmentation de minerais : un prototype de broyeur à boulets.

Quant aux caractéristiques de ce matériel, il s'agit d'un assemblage des pièces normalisées selon le dimensionnement calculé. Proprement dit, cette machine de trentaine de kilo, qui reste les analyses des résultats obtenus sur les opérations de broyage d'un échantillon de minerais.

Enfin, de par cette expérimentation, ce matériel peut être adapté à des différents domaines qui nécessitent l'utilisation de traitement de minerais.

Mots clés : Granulométrie, PAN, Corps broyants.

Nom : RAZAFINDRAKOTO  
Prénoms : Vaojaniriana Rado  
Adresse du candidat : Lot III D 61 Mahamasina - (101) ANTANANARIVO  
Email : [radorazafindrakoto@yahoo.fr](mailto:radorazafindrakoto@yahoo.fr)

Nom du Rapporteur : **RANDRIANJA Roger**