



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

MENTION GENIE MECANIQUE ET INDUSTRIEL

PARCOURS GENIE INDUSTRIEL



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
En vue de l'obtention du DIPLOME d'INGENIEUR
Grade MASTER 2 en GENIE INDUSTRIEL

CONCEPTION ET REALISATION
D'UN BROYEUR A MARTEAUX

Présenté par :

RAKOTOMALALA Nantenaina Jensen

Directeurs de Mémoire :

Monsieur RANDRIAMORASATA Josoa

Monsieur RAMAMONJISOA Mamitiana

Promotion 2018



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

MENTION GENIE MECANIQUE ET INDUSTRIEL

PARCOURS GENIE INDUSTRIEL



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
En vue de l'obtention du DIPLOME d'INGENIEUR
Grade MASTER 2 en Génie Industriel

CONCEPTION ET REALISATION
D'UN BROYEUR A MARTEAUX

Présenté par :

RAKOTOMALALA Nantenaina Jensen

Soutenu le 16 Janvier 2021 devant la Commission d'Examen composée de :

Président : **Monsieur RAKOTONAVAHY Manantsoa Soloniaina**

Examineurs :

- **Madame RAKOTOMANANA Iréna**
- **Monsieur RAZAFIMAHATRATRA Tafika**
- **Monsieur RAKOTONINDRIANA Tahiry**

Directeurs de Mémoire :

Monsieur RAMAMONJISOA Mamitiana

Monsieur RANDRIAMORASATA Josoa

Promotion 2018

Remerciements

Je rends grâce au Seigneur pour sa bonté et son soutien durant la réalisation de ce mémoire.

Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements aux personnes suivantes, sans qui je n'aurais pas accompli l'étude à l'ESPA, parmi lesquelles :

Monsieur RAKOTOSAONA Rijalalaina, Professeur titulaire et Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Monsieur RAKOTONINDRINA Tahiry, le responsable de la mention Génie Mécanique et Industriel.

Tout le corps enseignant, en particulier ceux de la mention Génie Mécanique et Industriel, qui nous a patiemment inculqué les connaissances nécessaires durant notre formation.

Monsieur RAMAMONJISOA Mamitiana et Monsieur RANDRIAMORASATA Josoa, Directeurs de ce mémoire, qui n'ont cessé de me prodiguer des suggestions et des conseils tout au long de ce mémoire malgré ses occupations.

Monsieur RAKOTONAVAHY Manantsoa Soloniaina, Maître de Conférences, Enseignant au sein de la mention Génie Mécanique et Industriel, pour l'honneur qu'il nous rend en présidant le jury de ce mémoire.

Madame et Messieurs :

- RAKOTOMANANA Iréna, membre du jury ;
- RAZAFIMAHATRATRA Tafika, membre du jury ;
- RAKOTONINDRINA Tahiry, membre du jury.

Qui ont accepté de sacrifier leur temps pour examiner ce travail.

J'exprime aussi mes remerciements à :

- La famille pour leur présence et leur soutien ;
- Tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Table des matières

Remerciements.....	i
Table des matières.....	ii
Liste des notations.....	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Introduction générale.....	1
Revue de la littérature.....	3
1.1 La fragmentation.....	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 Modes de fragmentation.....	3
1.1.3 Classes d'appareil de fragmentation	4
1.1.4 Procédé de fragmentation	5
1.1.5 Caractéristiques des matériaux à broyer	5
1.1.6 Importance de la réduction de la taille	7
Matériels et méthodes	8
2.1 Matériel à broyer	8
2.2 Equipement de broyage.....	8
2.2.1 Broyeurs à couteaux.....	9
2.2.2 Broyeurs à marteaux	9
2.2.3 Broyeurs à disques.....	10
2.2.4 Les broyeurs à jets de fluide et lit fluidisé	12
2.2.5 Les broyeurs à cylindres (ou rouleaux).....	13
2.2.6 Les broyeurs à meules	14
2.2.7 Broyeurs rotatifs à boulets ou à barres.....	15
2.3 Critères de choix d'un broyeur	17
2.4 Compilation de la littérature	17
2.4.1 Description de l'équipement.....	18
2.4.2 Sélection des matériaux de construction du broyeur	22
2.5 Analyse fonctionnelle	23
2.5.1 Enoncé fonctionnel du besoin : Outil bête à cornes	24
2.5.2 Analyse fonctionnel externe : Diagramme pieuvre.....	24

2.5.3	Analyse fonctionnel interne : Diagramme SADT ou Actigramme	25
2.6	Analyse de la problématique	27
2.6.1	Diagramme Ishikawa	27
2.6.2	Analyse FFOM	28
2.7	Conception et analyse de la machine (dimensionnement)	29
2.7.1	Analyse relative aux éléments de transmission du broyeur	30
2.7.2	Calcul de la vitesse de l'arbre	30
2.7.3	Longueur nominale de courroie	30
2.7.4	Puissance transmise par l'arbre	31
2.7.5	Force centrifuge exercée par les marteaux	33
2.7.6	Diamètre de l'arbre	34
2.7.7	Paramètres calculés du broyeur à marteaux	36
2.7.8	Sélection des roulements	36
2.7.9	Moteur électrique	36
2.7.10	Ventilateur centrifuge	36
2.7.11	Séparateur cyclonique	38
2.8	Procédure de test	38
2.9	Détails de fabrication	40
2.10	Coupe et mise en forme des parties de la machine	40
2.10.1	Volume de la trémie	40
2.10.2	Marteaux	40
2.10.3	Rotor	41
2.10.4	Plaque d'impact	42
2.10.5	Tamis	42
2.10.6	Chambre de broyage	42
2.10.7	Bâti	43
2.10.8	Ventilateur centrifuge	43
2.10.9	Séparateur cyclonique	46
	Résultats et discussions	49
3.1	Enoncé du besoin par l'outil bête à cornes	49
3.2	Identification des fonctions par le diagramme Pieuvre	50
3.3	SADT	51
3.4	Résultats des expérimentations sur le broyage	53

3.4.1	Essais utilisant du maïs	53
3.4.2	Essais utilisant du manioc.....	58
3.4.3	Essais utilisant du riz.....	60
3.4.4	Essais utilisant du café.....	62
3.5	Analyse de coût.....	65
3.5.1	Coût matériel	65
3.5.2	Coût du travail	66
3.5.3	Frais généraux.....	66
3.5.4	Comparaison des coûts, de la puissance et de la productivité	67
3.6	Diagramme Ishikawa.....	68
3.7	Analyse FFOM	70
Conclusion		71
Bibliographie.....		ix
Annexe.....		xi

Liste des notations

D_1 : Diamètre de la grande poulie [mm]

D_2 : Diamètre de la petite poulie [mm]

N_1 : Révolution de la grande poulie [tr/min]

N_2 : Révolution de la petite poulie [tr/min]

β : Angle de contact [Deg]

L_c : Longueur de la courroie [mm]

E : Entraxe entre la poulie menant et la poulie menée [mm]

α_1 : Angle d'enroulement de la grande poulie [Deg]

α_2 : Angle d'enroulement de la petite poulie [Deg]

T_1 : Tension dans le brin mou [N]

S : Contrainte maximale admissible de la courroie [MN/m²]

A : Section de la courroie [m²]

T_2 : Tension dans le brin tendu [N]

μ : Coefficient de frottement

θ : Angle des gorges [Rad]

F_c : Force centrifuge [N]

M : Masse par unité de longueur de la courroie [N/m]

ω : vitesse linéaire de la courroie [m/s]

M_t : Résultante de couple [Nm]

P : Puissance transmis [W]

w : Vitesse angulaire [rad/s]

F_h : Force centrifuge exercée par les marteaux [N]

N_h : Nombre de marteaux

m_h : Masse du marteau [kg]

r_h : Rayon du marteau [m]

ρ : Densité du matériau [kg.m⁻³]

V_C : Volume des marteaux [mm³]

$M_{b\ max}$: Moment de flexion maximum [Nm]

L : Longueur effective de l'arbre [m]

W : Force par unité de longueur [N/m]

l : Longueur de charge uniformément répartie [m]

d : Diamètre de l'arbre [mm]

S_S : Contrainte de cisaillement pour arbre

K_b : Choc combiné et facteur de fatigue appliqué au moment de flexion

K_t : Choc combiné et facteur de fatigue appliqué au moment de torsion

M_b : Moment de flexion [Nm]

M_t : Moment de torsion [Nm]

D : Diamètre du rouet du ventilateur [mm]

N : Vitesse de rotation du ventilateur [tr/min]

ρ : Masse volumique du fluide véhiculé [kg/m³]

D_c : Diamètre cyclone [mm]

M_b : Masse avant broyage [kg]

M_a : Masse après broyage [kg]

Liste des figures

Figure 1: Mode de fragmentation	4
Figure 2: Schéma d'un broyeur à couteaux.....	9
Figure 3: Schéma d'un broyeur à marteaux.....	10
Figure 4: (a,b) broyeurs à broches; (c) broyeur à disques moulées ; (d) broyeurs à disque plat vertical ; (e) broyeur à disque plat horizontale.....	11
Figure 5: Schéma d'un broyeur à broches.....	12
Figure 6: Broyeur à jet de fluide ; (a) Broyeur à contre jet, (b) Broyeur à jet en spiral, (c) Broyeur à jet en ovale	13
Figure 7: (a) broyeur à cylindres cannelés, (b) broyeur à cylindres lisses.....	14
Figure 8: Schéma d'un broyeur à meules verticale et broyeur à meules horizontale	15
Figure 9: Schéma du principe du broyage à boulets.....	16
Figure 10: Illustration séparateur cyclonique	21
Figure 11: Illustration du système de broyage (source : Wood hammer mill, Tianjin Anson International Co., Ltd.)	22
Figure 12: Diagramme bête à cornes	24
Figure 13: Illustration étape de mise en œuvre du diagramme pieuvre	25
Figure 14: Actigramme	26
Figure 15: Démarche décomposition d'un diagramme	27
Figure 16: Structure du diagramme Ishikawa	28
Figure 17: Illustration analyse FFOM	29
Figure 18: Dimension standard d'un cyclone.....	38
Figure 19: Représentation du marteau	41
Figure 20: Schéma de l'arbre de transmission.....	41
Figure 21: Illustration disque rotor	42
Figure 22: Chambre de broyage.....	43
Figure 23: Illustration assemblage hélice.....	44
Figure 24: Mise en page de la volute du caisson	45
Figure 25: Schématique de conception du broyeur à marteaux.....	46
Figure 26: Schématique de conception du broyeur à marteaux avec moteur et cyclone.....	47
Figure 27: Image de la machine fabriquée.....	48
Figure 28: Diagramme bête à cornes du broyeur	49
Figure 29: Illustration des interactions du système de broyage.....	50
Figure 30: SADT	52
Figure 31: Graphique analyse par tamisage du cumul pourcentage masse retenue et passante pour les échantillons de maïs par rapport à la taille du tamis	54
Figure 32: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du maïs	55
Figure 33: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du maïs retenu par tamis 1mm	56
Figure 34: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du maïs retenu par tamis 0,4mm	57
Figure 35: Graphique analyse par tamisage du cumul pourcentage masse retenue et passante pour les échantillons de manioc par rapport à la taille du tamis.....	59
Figure 36: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du manioc	59
Figure 37: Graphique analyse par tamisage du cumul pourcentage masse retenue et passante pour les échantillons de riz par rapport à la taille du tamis.....	61
Figure 38: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du riz	62

Figure 39: Graphique analyse par tamisage du cumul pourcentage masse retenue et passante pour les échantillons du café par rapport à la taille du tamis.....	63
Figure 40: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du café	64
Figure 41: Graphique de comparaison de coût par rapport à la puissance et la productivité	68
Figure 42: Diagramme Ishikawa du système de broyage	69
Figure 43: Photo de la machine fabriquée	xi

Liste des tableaux

Tableau 1: Echelle de dureté Mohs.....	6
Tableau 2: Equipement de broyage alimentaire.....	16
Tableau 3: Résultats des paramètres calculés du broyeur à marteaux	36
Tableau 4: Contrôle de validation du besoin	49
Tableau 5: Caractéristiques des fonctions de service.	50
Tableau 6: Résultats tests utilisant le maïs	53
Tableau 7: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de maïs.....	54
Tableau 8: Résultats tests utilisant le maïs retenu par le tamis 1mm	55
Tableau 9: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de maïs retenu par tamis 1mm	56
Tableau 10: Résultats tests utilisant le maïs retenu par le tamis 0,4mm	56
Tableau 11: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de maïs retenu par tamis 0,4mm	57
Tableau 12: Résultats tests utilisant le manioc.....	58
Tableau 13: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de manioc	58
Tableau 14: Résultats tests utilisant le riz.....	60
Tableau 15: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de riz	61
Tableau 16: Résultats tests utilisant le café.....	62
Tableau 17: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de café	63
Tableau 18: Coût matériel.....	65
Tableau 19: Coût du travail	66
Tableau 20: Coût des broyeurs existant sur le marché.....	67
Tableau 21: Analyse FFOM.....	70

Introduction générale

L'alimentation joue un rôle fondamental dans la survie des êtres vivants. Actuellement, le secteur de l'alimentation humaine est l'un des moteurs de base de l'industrie au niveau mondial, étant donnée l'importance de l'offre et la demande des produits alimentaires.

L'alimentation animale est aussi fondamentale pour le fonctionnement de nos sociétés étant une partie essentielle de l'économie des pays.

La modernisation des filières agroalimentaires en pleine croissance permettra de fabriquer des produits de qualité qui répondent aux besoins changeants des consommateurs, l'accent étant mis sur des aliments sains, de qualité et prêts à l'emploi.

Cette modernisation nécessite l'utilisation de techniques et d'équipements adaptés aux besoins des secteurs artisanaux et semi-industriels. Aujourd'hui, la recherche doit se focaliser sur la production et le développement de technologies améliorées combinant les procédés technologiques modernes et les pratiques traditionnelles de transformation des produits alimentaires. Les domaines cibles dans ce travail sont principalement les appareils de broyage et ses multiples choix qui représentent les principaux systèmes de transformation des produits alimentaires. Cet ouvrage sur la transformation des produits alimentaires permet de faire le point sur les technologies existantes au niveau artisanal et semi-industriel et d'identifier les opérations unitaires susceptibles d'amélioration technologique en visant l'efficacité technique et économique en termes d'énergie et d'environnement, et en se concentrant sur les normes de qualité des produits obtenus.

Ainsi une question se pose : Comment peut-on avoir une bonne qualité de broyage avec un coût de réalisation abordable du dispositif et de même la consommation d'énergie?

C'est pour cela que nous avons entrepris ce projet « Conception et réalisation d'un broyeur à marteaux ».

Cette étude couvre la conception de fabrication et expérimentation d'un broyeur à marteaux pour le broyage de matériel moyennement faible (dureté) comme le riz, manioc, maïs, café et également les éléments constituant en provende... c'est-à-dire les produits d'alimentation humaine et animale avec une capacité de broyage variant entre 40 à 60 kg/h.

Notre objectif étant l'amélioration de l'efficacité de broyage ; visant la conception d'un broyeur respectant la qualité et destiné à l'usage des opérateurs; facile d'usage et de longue durée de vie. Pour cela, nous allons orienter notre travail vers l'étude et la réalisation d'une machine qui satisferait les impératifs de compétitivité en terme de coût de réalisation par des solutions simples, de performance par l'assurance d'un rendement très élevé, en offrant ainsi la possibilité au producteur de s'offrir un équipement à un prix abordable, et rentabiliser sa production.

Guider le choix des matériels de fragmentation en suivant la règle de l'art (normes) et du coût servir d'élément décisionnel pour ceux qui s'intéressent aux domaines de la technique de fragmentation des solides en général et du broyage en particulier. Notamment aux connaissances relatives au dimensionnement des broyeurs.

A cet effet nous allons voir en premier lieu une revue de la littérature concernant la technique de fragmentation qui nous conduira au choix du broyeur qui satisfera nos critères, Ensuite une méthodologie pour l'analyse de qualité dans le processus de conception intégrant des modèles basés sur l'analyse fonctionnelle et des diagrammes (APTE, SADT, FFOM) ont été proposés.

Et enfin une observation pratique avec expérimentation, interactions et discussion avec les existants sur le rapport productivité et coût de réalisation.

Pour ce faire nous allons suivre le plan IMRED.

Revue de la littérature

1.1 La fragmentation

1.1.1 Définition

La fragmentation, désigne un processus par lequel un objet est divisé en un grand nombre de petits morceaux. Concrètement, la fragmentation s'adresse aux solides dont la taille veut être réduite en des éléments ou particules de taille inférieure et de granulométrie déterminée.

(1)

1.1.2 Modes de fragmentation

Pour la réduction de taille, les aliments sont coupés en gros ou en petits morceaux de formes régulières ou aléatoires, les critères de base dans la classification des processus de réduction de taille sont :

- le type et la façon dont les forces sont appliqués,
- et les caractéristiques de construction des équipements de réduction de taille.

Compte tenu du type et la manière dont les forces principales sont appliquées, (Figure 1)

1. **Forces principales** : compression, coupe, cisaillement et impact. Assez souvent, divers combinaisons de forces sont appliquées.
2. **Application des forces** : pression et/ou attrition du matériau placé entre les surfaces de l'outil, force de cisaillement sur le matériau, collision entre particules ou impact entre les particules et les outils, et frottement à travers le milieu environnant les particules.

En fonction des caractéristiques de construction de l'équipement, la réduction de taille peut être classée en fonction du nombre d'outils de réduction de taille utilisés et du type de forces appliquées :

- Utilisation de deux outils (compression du matériau entre deux surfaces) : compression (presses, broyeur à cylindres), impact et cisaillement (broyeur à boulets) et cisaillement (par coupe, broyeur à couteaux).
- Utilisation d'un seul outil (frapper le matériau avec un seul outil) : impact (par exemple marteau), cisaillement (broyeur à disque).

- Réduction de la taille à travers le milieu environnant (attrition du matériau par un flux d'air) : impact (par exemple broyeur à jet), impact et cisaillement (broyeur à jet circulaire). (2)

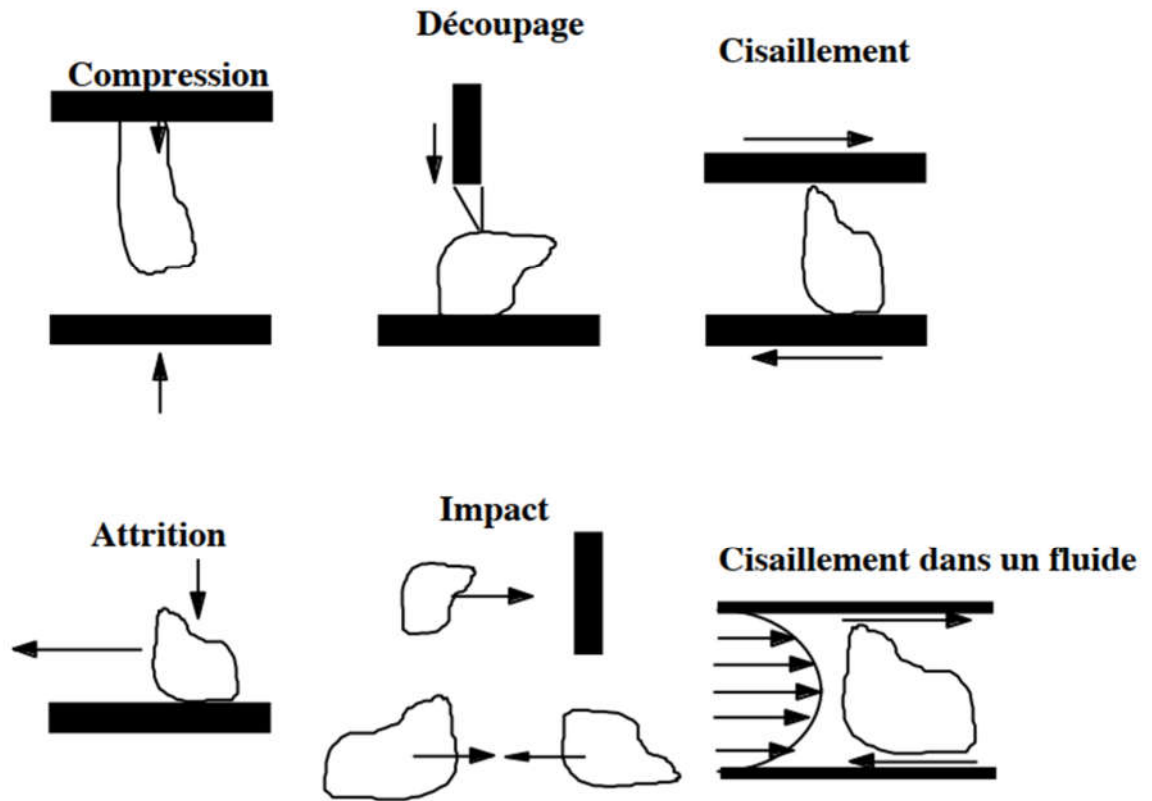


Figure 1: Mode de fragmentation

1.1.3 Classes d'appareil de fragmentation

On distingue les termes suivants relatifs à cette réduction de taille :

- *Débitage* : réduction des gros issus de mine ou de carrière en élément de dimensions supérieures à 100 mm
- *Concassage* : réduction à des dimensions allant de 25 à 100 mm
- *Granulation* : réduction à des dimensions allant de 6.3 à 25 mm
- *Broyage* : réduction à des dimensions comprises entre 0.4 et 6.3 mm
- *Pulvérisation* : production de particules inférieures à 0.4 mm
- *Micronisation* : réduction à des dimensions de l'ordre du micron

Selon la structure du produit à fragmenter, les méthodes sont les suivantes :

- *Défibrage* : fragmentation des matières fibreuses (bois, végétaux,...)
- *Déchiquetage* : réduction par hachage des matières flexibles

- *Découpage* (par laser, par jet d'eau, par oxydation, par plasma,...) : sciage ou cisaillement pour obtenir des fragments réguliers.

1.1.4 Procédé de fragmentation

Le procédé de fragmentation des solides peut avoir lieu en circuit ouvert ou en circuit fermé :

- **En circuit ouvert**, les produits ne passent qu'une seule fois dans le broyeur.
- **En circuit fermé**, la granulométrie des produits est contrôlée dès la sortie, et les produits dont la granulométrie est trop grosse sont aussitôt renvoyés pour être remis dans le broyeur.

En pratique, la fragmentation en circuit fermé est la technique la plus fréquemment rencontrée. Les particules passent au travers d'un crible et comme précisé ci-dessus, celles qui sont insuffisamment réduites sont renvoyées pour être réintroduits dans le broyeur. (1)

1.1.5 Caractéristiques des matériaux à broyer

1.1.5.1 Taux d'humidité

Le taux d'humidité est généralement admis de 1 à 4%. Au-delà, il risque de formation de pâte avec blocage du broyeur, due au colmatage des tamis. (3)

1.1.5.2 Dureté Mohs

L'échelle de Mohs fut inventée en 1812 par le minéralogiste allemand Friedrich Mohs afin de mesurer la dureté des minéraux. Elle est basée sur dix minéraux facilement disponibles.

Comme c'est une échelle ordinale, on doit procéder par comparaison (capacité de l'un à rayer l'autre) avec deux autres minéraux dont on connaît déjà la dureté. Cette échelle n'est ni linéaire ni logarithmique. (4)

Tableau 1: Echelle de dureté Mohs

Dureté	Minéraux	Catégorie
10	Diamant	Durs
9	Corindon	
8	Topaze	
7	Quartz	
6	Orthose	Moyennement durs
5	Apatite	
4	Fluorine	
3	Calcite	Mous
2	Gypse	
1	Talc	

1.1.5.3 Friabilité

Sans rapport avec la dureté, c'est la facilité avec laquelle une substance est brisée par percussion. Le charbon et le diamant sont des substances friables, les matières plastiques ne sont pas friables.

1.1.5.4 Broyabilité

La broyabilité est souvent utilisée pour caractériser le taux de réduction de taille par un certain équipement de réduction de taille. Elle est définie comme la quantité de produit qui répond aux exigences d'une spécification particulière, soit la masse de produit passant à travers un tamis d'une certaine maille par heure. La broyabilité est liée au module d'élasticité et de dureté. (3)

1.1.5.5 Surface spécifique

C'est la surface représentée par l'ensemble des grains des matériaux rapportés à l'unité de masse s'exprime généralement en cm^2 / g .

La connaissance de cette surface spécifique permet la détermination du degré de finesse d'un produit. Plus cette valeur est élevée plus le produit de broyage est fin et inversement. (3)

1.1.6 Importance de la réduction de la taille

- Obtenir la taille requise pour certains produits (par exemple, poudre de chocolat, sucre en poudre, tranches de viande, etc.).
- Augmenter la surface spécifique. Cela facilite plusieurs processus, tels que l'échange de chaleur, l'extraction et les réactions chimiques et biologiques (par exemple, blanchiment, stérilisation, congélation, extraction de l'huile de graines, acidification).
- Améliorer le mélange et le malaxage (par exemple, les épices, les confiseries et les mélanges de fruits).
- Gain de certains produits (par exemple, jus en pressant, farine de grain de blé).
- Faciliter le transport (par exemple, les carcasses de viande, le pesage exact des poudres) et le dosage (par exemple, pour préparer des plats cuisinés).
- Exposition d'une plus grande surface pour la digestion.
- Amélioration de la facilité de manipulation de certains ingrédients.
- Aide au mélange et à l'équilibrage homogènes des rations.
- Augmentation de l'efficacité de granulation et de la qualité des granulés.
- Réduire le gaspillage d'aliments, en minimisant l'alimentation sélective.
- Aider à la mastification des animaux aux dents médiocres (petits et grands).
- Augmentation de la consommation d'aliments par unité de temps.
- Satisfaire les préférences des clients.

Matériels et méthodes

Dans cette partie les matériels étudiés pendant ce projet seront les produits alimentaires courants sur le marché ainsi on choisira quel dispositif sera le mieux adapté contenu des critères de sélection ; ensuite une approche plus détaillée du point de vue de conception du système de broyage sera mise en évidence ; de plus les méthodes de travail de fabrication et d'expérimentation seront aussi énumérer.

2.1 Matériel à broyer

Les produits alimentaires peuvent être classés comme durs (par exemple les noix ou les os) ou mous (comme les matières grasses). Les produits alimentaires peuvent être cassants (par exemple, pain grillé) ou ductile (par exemple, pâte). Certains aliments, tels que les gommes, sont élastiques, tandis que d'autres sont viscoélastiques (par exemple, la viande, les raisins secs). Cependant, la plupart des aliments combinent plus de caractéristiques de résistance, en raison de leur texture d'origine, de leur caractère biologique (aucune similitude absolue entre les aliments n'est possible) et du fait que les conditions de transformation, de manipulation et de stockage influencent leur texture et leur résistance. (2)

Notre étude se concentrera sur les produits alimentaires suivants :

- Maïs
- Riz
- Manioc
- Café

Qui sont caractérisés comme matériels mous en fonction de l'échelle de Mohs. Avec un taux d'humidité moindre, soit impérativement sec.

2.2 Equipement de broyage

Qu'il s'agisse de réduire la matière en poudre, il nécessite énormément d'énergie. C'est pourquoi l'Homme a domestiqué les sources d'énergie qui l'entourent; que ce soit l'énergie musculaire (humaine : pied / main, traction animal), force motrice du vent (moulin à vent), énergie hydraulique (eau), énergie thermique ; d'autant plus, l'énergie électrique est la plus courante en terme de broyage. Celle-ci est représentée en deux parties, la partie système de broyage et le moteur électrique. On distingue différents types de dispositif à broyer comme citer ci-dessous.

2.2.1 Broyeurs à couteaux

Le broyeur à couteaux broie par effet de coupe et de cisaillement. La matière chargée passe par la trémie pour accéder à la chambre de broyage où elle est interceptée par le rotor puis broyée entre celui-ci et les contre-couteaux situés dans le carter.

Ces appareils sont particulièrement recommandés pour le traitement des matériaux fibreux tels que les légumes, les plantes aromatiques et certaines épices mais aussi pour les matières plastiques et le papier.

Le principe de broyage consiste à la réduction de taille par découpe et cisaillement. (5)

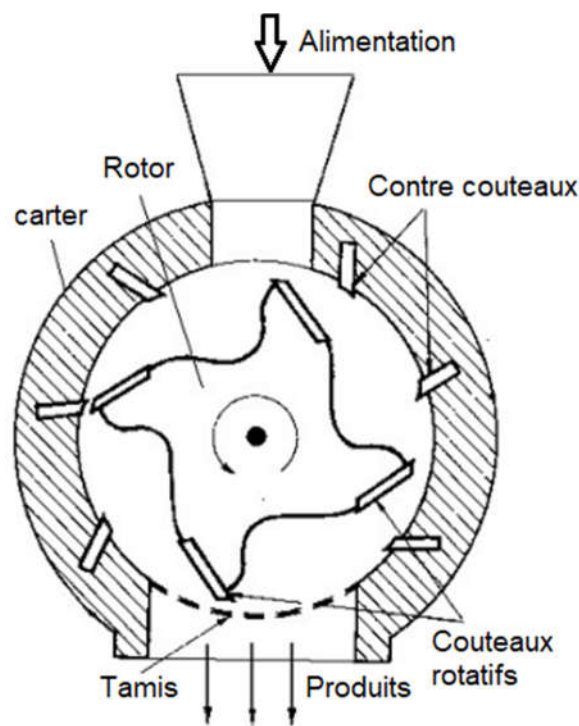


Figure 2: Schéma d'un broyeur à couteaux

2.2.2 Broyeurs à marteaux

Le broyeur à marteaux est composé d'un rotor assemblé axialement, tournant dans une chambre de broyage dont la partie inférieure est un tamis. Le produit introduit dans la chambre est frappé par les marteaux en rotation rapide, et quitte la chambre lorsqu'il peut passer à travers le tamis du fond.

Ils produisent une réduction de taille par impact entre les particules et une surface dure.

Ces appareils couvrent un large domaine de distributions granulométriques dans la mesure où on peut changer les marteaux et les grilles. Ils permettent de traiter des matériaux tendres et de dureté moyenne avec des tailles de particules uniforme qui est déterminé par la perforation du tamis.

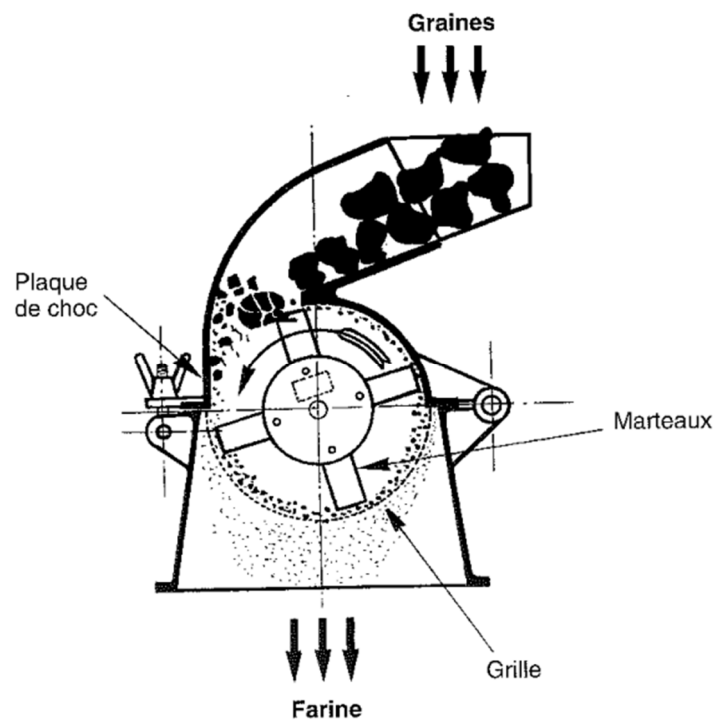


Figure 3: Schéma d'un broyeur à marteaux

Les besoins énergétiques des broyeurs à marteaux dans l'industrie alimentaire varient généralement de 5 à 35 kW. Leur consommation d'énergie spécifique est d'environ 0,2 à 2 kWh par tonne. Les principales dimensions extérieures des broyeurs à marteaux varient selon le nombre de marteaux utilisés. (5)

2.2.3 Broyeurs à disques

Ils se caractérisent par l'interchangeabilité de couples rotor-stator (broches, disques de cisaillement) qui leur donne une grande diversité d'applications.

Il existe deux catégories principales de broyeur à disques, ceux avec des surfaces moulées et ceux à surface planes. L'équipement des deux catégories se compose de disques ronds parallèles les uns aux autres. Le matériau est alimenté en continu dans l'espace entre le disque rotatif au niveau de l'axe de la chambre de broyage et est projeté par force centrifuge

contre le disque fixe du stator. Selon le type de machine, l'un ou les deux disques peuvent tourner. Dans le cas où les deux disques tournent, le deuxième disque tourne en sens inverse. Dans les broyeurs à broches, les disques ont plusieurs broches métalliques, placés symétriquement et concentriquement sur les surfaces du disque. Les broyeurs à disque plat peuvent être verticaux ou horizontaux.

Les broyeurs à disques sont utilisés pour le broyage fin ou très fin. Les forces mobilisées pendant le broyage dans les disques moulés sont basés sur le principe de force d'impact, d'attrition et de cisaillement

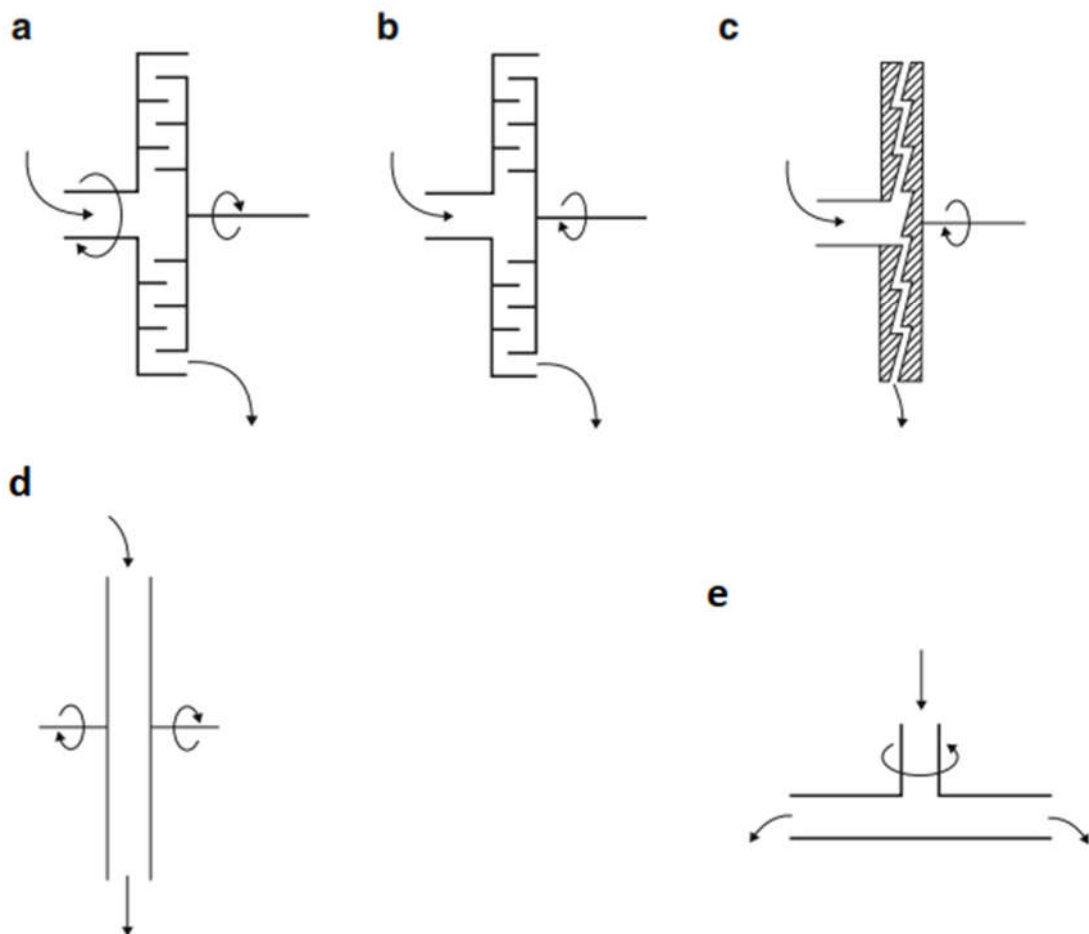


Figure 4: (a,b) broyeurs à broches; (c) broyeur à disques moulées ; (d) broyeurs à disque plat vertical ; (e) broyeur à disque plat horizontale

La réduction de taille est contrôlée par l'ajustement de l'écart entre les disques et par des tamis placés sur la partie inférieure du broyeur. Les broyeurs à broches peuvent broyer de

0,05 à 6 tonnes par heure. En fonction du produit, de la taille finale des particules et de la capacité, la consommation d'énergie peut varier de 3 à plus de 100 kW.

La consommation d'énergie spécifique des broyeurs à disques est de 10 à 100 kWh par tonne, à des vitesses périphériques de 100 à 200 m/s. Habituellement, la vitesse périphérique des meuleuses à broches est de 80 à 160 m/s et le diamètre des disques peuvent être jusqu'à 1 m. (2) (5)



Figure 5: Schéma d'un broyeur à broches

2.2.4 Les broyeurs à jets de fluide et lit fluidisé

Ce type de broyeurs opère la réduction de taille en générant des collisions : les particules, accélérées par des jets de gaz à grande vitesse sont fragmentées par choc, tandis que l'air les entraîne.

On peut les classés en trois variations basiques : (1) broyeur à contre jet, (2) broyeur à jet en spirale, (3) Mélangeur à jet en ovale. Les broyeurs à jet sont utilisés pour le broyage très fin de matériaux durs ou moyennement durs.

Dans le broyeur à contre jet, les particules sont broyées sous forme de collision entre deux jets les contenant quand ils se rencontrent. Les deux jets coulent sur le même axe mais de directions opposées (Fig. 6a). Réduction de taille par impacts et collisions.

Dans le broyeur à spirale, le produit est injecté au moyen d'air comprimé, le flux d'air à grande vitesse, tournant dans un canal circulaire (Fig. 6b). Il y a réduction de taille par attrition intensive des particules sur les parois des canaux.

Le mélangeur à jet en ovale se compose d'un canal ovale dans lequel circulent l'air et les particules. Le nouveau produit est alimenté en continu dans la partie inférieure du canal ovale. Dans la partie supérieure, les plus grosses continuent leur chemin à travers le canal vers le bas, tandis que les plus petites sont aspirées (Fig. 6c).

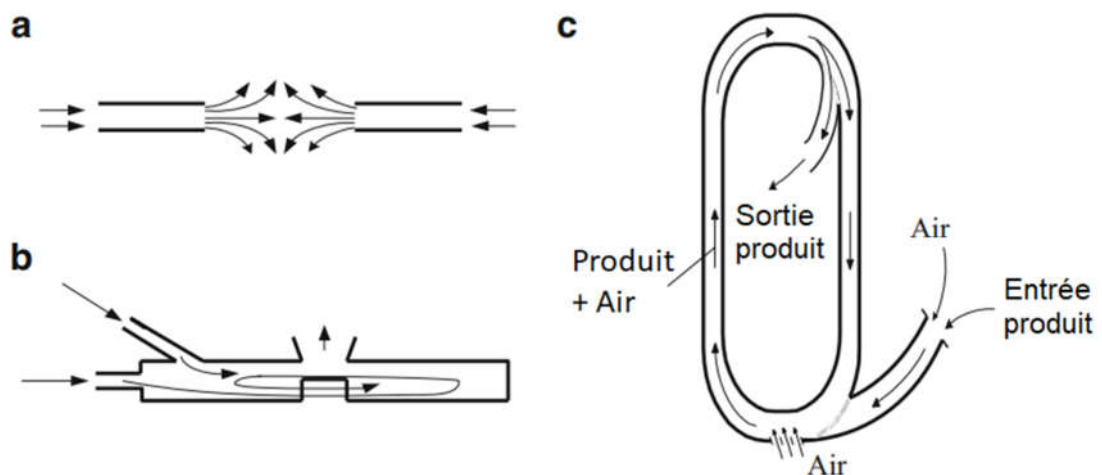


Figure 6: Broyeur à jet de fluide ; (a) Broyeur à contre jet, (b) Broyeur à jet en spiral, (c) Broyeur à jet en ovale

Les broyeurs à jet sont utilisés pour le broyage très fin de particules dures ou moyennement dures sensibles à la température. Leur capacité varie de 0,05 à 10 tonnes/h. (2) (5)

2.2.5 Les broyeurs à cylindres (ou rouleaux)

Très utilisés dans les industries, on les trouve dans de nombreux secteurs. Ils comportent généralement plusieurs paires de cylindres. Pour chaque paire, les cylindres tournent en sens opposé et à des vitesses différentes. Les surfaces des cylindres sont lisses ou cannelées, leurs vitesses de rotation et leur écartement conditionnent la finesse de la mouture.

Lorsque les cylindres sont lisses, les forces de compression et de frottements engendrent la fracture tandis qu'avec des cylindres cannelés on exploite l'action de cisaillement.

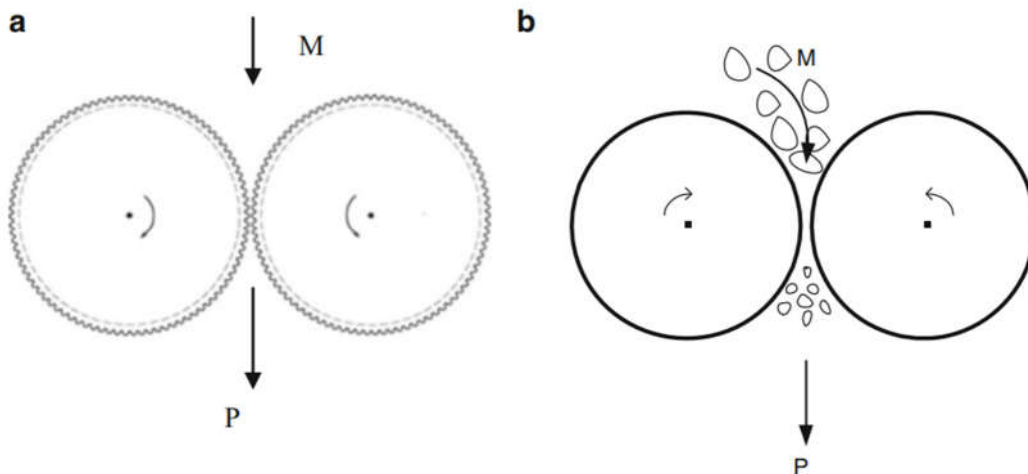


Figure 7: (a) broyeur à cylindres cannelés, (b) broyeur à cylindres lisses

La capacité des nouveaux broyeurs à cylindres dépend du produit (par exemple, le type et l'état du produit), le chargement du broyeur, la vitesse différentielle des rouleaux et le stade de broyage (finesse du produit). Il est exprimé en $\text{cm} / 100 \text{ kg} / 24 \text{ h}$. Il existe une assez grande variation des systèmes de broyage et des capacités. Une valeur indicative pour les moulins à faible longueur spécifique des rouleaux est de $2 \text{ cm} / 100 \text{ kg} / 24 \text{ h}$ (valeurs pour la mouture du blé). L'énergie consommée est d'environ 35 à 45 kWh / tonne. Une unité de broyage traditionnelle compte environ 14 laminoirs. Récemment, ce nombre est inférieur, car il existe des machines avec plus de paires de rouleaux. (2)

2.2.6 Les broyeurs à meules

Les moulins à meules sont constitués de 2 à 4 rouleaux lourds tournant autour d'un axe au centre dans lequel le produit est alimenté. Les modes de fragmentation mises en jeu étant la compression, l'abrasion et le cisaillement.

La principale utilisation actuelle de ce type de broyeur se trouve aujourd'hui dans la production d'huile d'olive.

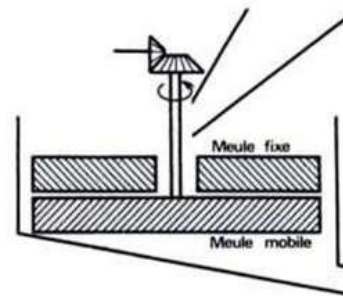
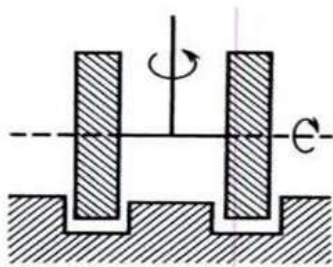


Figure 8: Schéma d'un broyeur à meules verticale et broyeur à meules horizontale

Une capacité indicative pour les olives est de 2 à 3 tonnes / h. Leur principal avantage est un traitement doux (basse température et vitesse). La consommation d'énergie des machines est liée au volume du bac, par exemple, une machine avec deux rouleaux et un bac de 500 litres nécessite 22 kW. (5)

2.2.7 Broyeurs rotatifs à boulets ou à barres

Les broyeurs à boulets sont destinés à moudre des solides en poudres très fines.

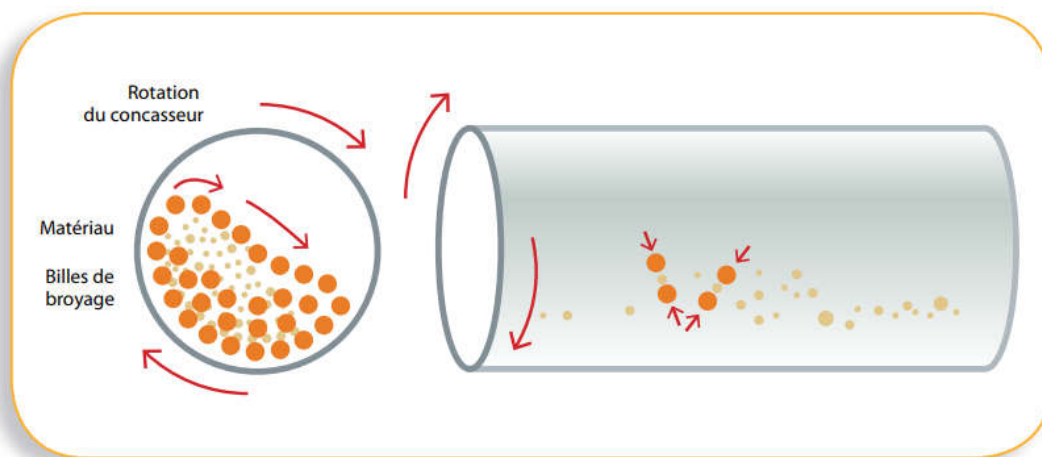
Le broyeur à boulets se compose d'un tambour horizontal partiellement rempli du produit à moudre et des éléments de broyage. Sa paroi intérieure est équipée de barres releveuses qui, comme le nom l'indique, relèvent les boulets afin qu'ils retombent sur le produit à broyer. Les corps broyant sont généralement des boulets d'acier inoxydable : leur efficacité est due à la forte densité de ce métal et à la relative «inertie» de l'inox qui ne contamine pas trop les produits à broyer. En général, le tambour est rempli à 30% de sa capacité en boulets.

Le broyeur à boulets peut être compartimenté (chambre) ; la taille et la quantité de boulets étant différentes dans chaque chambre afin d'optimiser celles-ci en fonction de la taille du produit qui la traverse.

Les broyeurs industriels fonctionnent généralement en continu : ils sont chargés à une extrémité et déchargés à l'autre.

Le broyeur à barres repose sur le même principe que le broyeur à boulets. La différence vient simplement de l'utilisation de barre plutôt que de boulet. Les barres sont généralement faites en acier très résistant.

Les forces pendant le broyage sont impact et attrition. (1)



Principe de broyeur à boulets.

Figure 9: Schéma du principe du broyage à boulets

Une synthèse des caractéristiques des broyeurs est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 2: Equipement de broyage alimentaire

Type de réduction taille	Equipement		Taille finale du produit	Taux de réduction (initial/final)	Principale force appliquée
Utilisation de deux outils	Broyeur à cylindres		5-100 μm	>20	Compression
	Broyeur à meules		0,05-1 mm	10	Compression
	Broyeur à boulets/barres		0.05-1 mm	10	Impact et attrition
Utilisation d'un seul outil	Broyeur à marteaux		50 μm -10 mm	10	Impact (et cisaillement)
	Broyeur à disques		2-50 μm	>50	Impact et cisaillement
Réduction de la taille à travers le milieu environnant	Broyeur à jet de fluide	à contre jet	1-100 μm	>50	Impact
		à jet en spirale	1-100 μm	>50	Impact et cisaillement
		à jet en ovale	5-100 μm	10-50	cisaillement

2.3 Critères de choix d'un broyeur

Bien qu'il existe de nombreux outils de broyage sur le marché, il est important de bien dimensionner et bien choisir son broyeur vu son prix élevé et la diversité de mode et techniques de broyage que propose chacun. Pour cela on distingue plusieurs critères pour choisir un broyeur qui sont donnés comme suite :

- Nature, texture et condition de la matière à broyer (produit d'alimentation humaine ou animal: maïs, blé, manioc, épices, ...)
- Production de mouture par la matière durant le broyage (broyage sec et humide)
- Fiabilité et disponibilité ; dès qu'on a déterminé la nature de matière à broyer, il est temps de sélectionner notre broyeur selon sa disponibilité sur le marché, non seulement sa disponibilité comme machine mais aussi la disponibilité de ses pièces de rechanges et la facilité de maintenance, de plus notre broyeur doit avoir une bonne fiabilité avec un bon rendement et une longue durée de vie, ce qui nous donne deux critères qui ont une grande influence sur le choix d'un broyeur
- Résistance à l'usure des outils de broyage
- Productivité désirée
- Economique: cout de réalisation
- Combinaison avec d'autres opérations
- Qualité des produits (granulométrie uniforme).

En égard à toutes ces considérations, nous sommes d'avis que deux types de broyeur conviennent aux types de produits étudiés dans le cadre de ce travail ; ce sont les broyeurs à marteaux et les broyeurs à disques. Les broyeurs à disques remplissent ces critères mais les broyeurs à marteaux sont plus adaptés aux contextes d'utilisation à Madagascar car ils peuvent être fabriqués sur place, ainsi des services après-vente sont disponibles.

2.4 Compilation de la littérature

Les broyeurs à marteaux sont utilisés depuis longtemps pour la réduction des particules de matériaux. Au même temps, un système de broyage bien conçu offrira plus de performance à long termes. La discussion suivante sera focalisée à la fois la théorie du fonctionnement d'un broyeur à marteaux ainsi que bien fournir les principes d'ingénierie sur lesquels les systèmes peuvent être conçus avec succès.

2.4.1 Description de l'équipement

Un broyeur à marteaux consiste en un ensemble de rotor (deux ou plusieurs plaques de rotor fixées sur un arbre principal) enfermé dans une certaine chambre de broyage. Les mécanismes de travail sont les marteaux qui peuvent être fixes ou oscillants par rapport à l'écran ou les plaques de choc entourant le rotor.

Les marteaux ou batteurs tournent généralement entre 500 à 3 000 tr/min. Néanmoins, dans certains cas, comme dans la micro-pulvérisation du sucre, ils peuvent tourner plus rapidement (par exemple, 6500 tr/min).

Le rotor est normalement supporté aux deux extrémités par l'arbre et roulements. Ceci fournit une rotation plus stable et réduit la tendance d'un arbre de rotor à s'enrouler ou à manquer de charge. Les marteaux sont simplement des barres métalliques plates percées d'un trou à une extrémité ou aux deux extrémités et subissent généralement un traitement de surface dure sur les extrémités actives. Les marteaux peuvent être fixés, mais on rencontre souvent des marteaux pendulaires, où les marteaux flottent sur des broches ou tiges. Cette conception de marteau oscillant facilite grandement le changement de marteaux lorsque les arêtes de travail sont usées.

La réduction dans un broyeur à marteaux est principalement due à l'impact entre le marteau en mouvement rapide et la matière entrant, d'une part, et entre le marteau et le contre marteau, d'autre part. Il y a un peu d'attrition entre les particules et entre les marteaux et l'écran. (6)

2.4.1.1 Largeur maximale par le haut

La conception moderne des marteaux inclut une alimentation par le dessus sur toute la largeur afin d'obtenir une efficacité maximale et de minimiser les coûts d'exploitation. Une alimentation pleine largeur sur le dessus assure que toute la surface de l'écran peut être utilisée et que le travail à accomplir sera réparti uniformément sur le motif de marteau complet. (6)

2.4.1.2 Chambre de broyage

Une chambre de broyage en forme de larme est nécessaire pour empêcher le matériau de circuler simplement dans la chambre de broyage. Dans cette dernière, la matière première est repoussée par les marteaux rotatifs à grande vitesse, puis heurte la plaque de tamis et rebondit. Le battement et la frappe seront continus avec la rotation à grande vitesse du rotor. La matière première sera broyée par la force d'impact des marteaux et la force de

friction de la plaque de tamisage. Lorsque la taille de la matière première est plus petite que les trous sur le tamis, elle sera évacuée par l'attraction du ventilateur ou par gravité. (6)

2.4.1.3 Support de l'arbre du rotor

a) Arbre soutenu sur les bords

Comme indiqué précédemment, le rotor devrait être supporté à chaque extrémité, de préférence avec des roulements et des paliers à roulement standard. Un support adéquat du rotor est particulièrement important compte tenu de la demande croissante en capacité. L'utilisation de roulements et de paliers standards constitue un avantage supplémentaire pour le client en augmentant le nombre de pièces de rechange disponibles en cas de besoin. (6)

b) Support de rotor rigide

Afin de maintenir la position relative du rotor par rapport à la chambre de broyage (écrans et mécanismes de support), la base du broyeur doit être extrêmement rigide, car même dans des circonstances normales, un broyeur à marteaux sera soumis à des vibrations et des chocs. Une structure rigide maintient positivement les jeux entre les embouts de marteau et le tamis pendant toute la rotation pour un traitement cohérent et efficace. Ceci doit être accompli sans sacrifier l'accessibilité à la chambre de broyage, car un entretien de routine des marteaux et des tamis sera nécessaire. (6)

2.4.1.4 Marteaux

Les marteaux en acier rectangulaires sont fixés à un arbre à l'intérieur d'une chambre de broyage en acier. Au fur et à mesure que l'arbre tourne, les marteaux s'affaissent, les mettant en contact avec le matériau en cours de traitement. Les motifs et les positions des marteaux ont un effet profond sur les performances de tout broyeur à marteaux. Étant donné que les matériaux utilisés diffèrent, le nombre idéal de marteaux (motif) et le jeu par rapport à l'écran (position) devront être ajustés en fonction de chaque application. Dans le même temps, il est important de s'assurer que le motif du marteau recouvre complètement la grille de travail sans laisser de marteaux en fuite, c'est-à-dire des marteaux placés sur des broches adjacentes alignées avec le marteau précédent. Une couverture d'écran complète assure une efficacité maximale des processus et permet de contrôler les coûts d'exploitation en tirant le meilleur parti de chaque ensemble d'écrans. (6)

2.4.1.5 Tamis

La taille appropriée de l'écran est déterminée par la taille de particules finie souhaitée et les propriétés du matériau traité. Des caractéristiques telles que la friabilité et la teneur en humidité ont une incidence sur la facilité avec laquelle un matériau est réduit. En conséquence, l'utilisation du même écran pour traiter des matériaux de propriétés différentes se traduira par une gamme de tailles de particules différentes. (6)

2.4.1.6 Option d'évacuation du broyeur

Une fois que le matériau est réduit à la taille de particule finale désirée et passé à travers l'écran, il existe deux options pour sa sortie du broyeur.

a) Déchargement par gravité

Le matériau reste dans la chambre de broyage jusqu'à ce qu'il soit suffisamment dimensionné pour passer à travers l'écran perforé qui recouvre la moitié inférieure de la chambre de broyage. Les matériaux broyés sont déchargés par gravité. Ce système est adéquat si le diamètre de perforation du tamis est grossier.

b) Déchargement pneumatique

Tout est à propos du ventilateur. Les broyeurs à air balayé sont principalement utilisés lors du broyage de matériaux légers et relativement non abrasifs allant de la plage moyenne à la taille des particules fines généralement inférieure à 1mm, car les particules plus légères nécessitent une aspiration pour vaincre le flux d'air du rotor. Le ventilateur tire le matériau du broyeur par l'alimentation à travers la chambre de broyage. De plus, il tire le produit fini à travers le tuyau d'aspiration, dans le ventilateur lui-même, puis souffle le produit hors du tuyau de refoulement pour le stocker ou vers l'étape suivante de broyage, en principe à travers l'équipement spéciale appelé cyclone. (6)

2.4.1.7 Séparateur cyclonique

Les cyclones sont des unités simples et peu coûteuses, le mélange particules / air pénètre dans le cyclone tangentielllement, suivant un schéma d'écoulement en spirale de haut en bas et un flux de vortex de bas en haut, et sort du collecteur. Les particules solides sont soumises à une force centrifuge auto-générée, projetée sur les parois du cyclone, d'où elles tombent et sont collectées au fond. L'air sort du sommet du cyclone et peut contenir des quantités importantes de particules de petite taille. Afin d'éliminer les très petites particules qui

s'échappent du cyclone et provoquent une pollution particulaire dans l'environnement, on peut acquérir des filtres à manches d'épurateurs humides qui doivent être installés après le cyclone. (2)

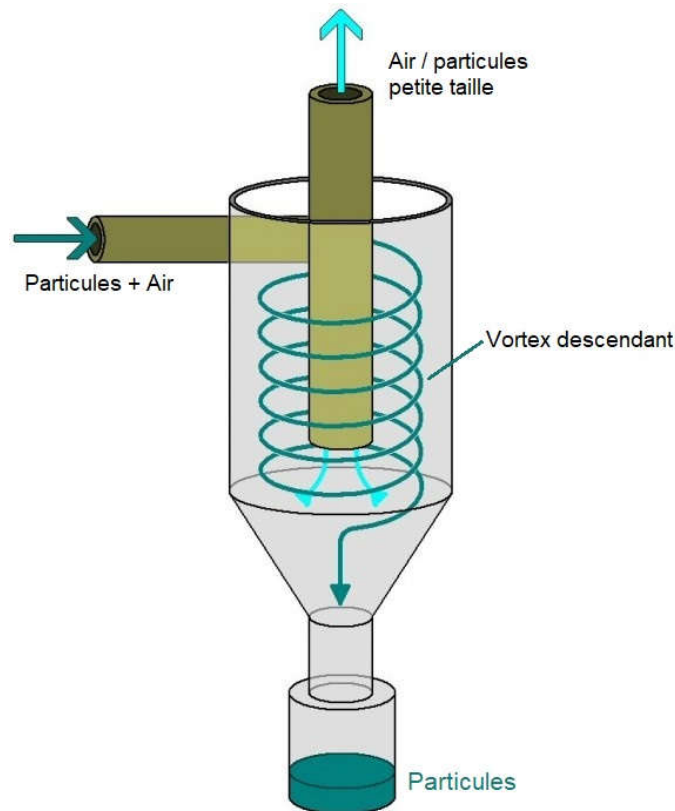


Figure 10: Illustration séparateur cyclonique

On a pu se familiariser sur le principe de fonctionnement du broyeur à marteaux et on a remarqué que plusieurs paramètres peuvent intervenir pour l'amélioration de la technique de broyage avec un système de décharge pneumatique, la capacité du ventilateur à tirer le matériau à travers l'écran permet une augmentation de la productivité.



Figure 11: Illustration du système de broyage (source : Wood hammer mill, Tianjin Anson International Co., Ltd.)

2.4.2 Sélection des matériaux de construction du broyeur

Les propriétés et le coût des matériaux de construction sont des facteurs très importants dans la conception, la construction, l'exploitation et l'entretien de l'équipement de traitement général.

Les principaux matériaux utilisés pour les équipements de transformation des aliments sont les métaux. Les matériaux utilisés dans la construction des équipements alimentaires doivent avoir les propriétés suivantes:

- résistance mécanique,
- facile à fabriquer,
- facile à réparer,
- résistance à la corrosion,
- propriétés hygiéniques, et
- propriétés thermiques souhaitables.

Les matériaux hygiéniques (sanitaires) n'échangent pas de composants avec l'aliment, c'est-à-dire qu'ils ne contaminent pas l'aliment ou n'absorbent pas les composants du produit

transformé. Ils doivent avoir des surfaces lisses ou polies, ne pas réagir avec les détergents et être nettoyés facilement.

Les métaux ferreux utilisés pour l'équipement de transformation des aliments sont l'acier au carbone, l'acier faiblement allié, la fonte, l'acier inoxydable et l'acier inoxydable moulé. L'acier inoxydable est le principal matériau utilisé en contact direct avec les aliments. Un choix judicieux et approprié des matériaux est obtenu en utilisant un outil spécifique tel que l'analyse fonctionnelle descendante. (2)

2.5 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est utilisée dans les premières phases d'un projet pour créer ou améliorer un produit. Elle se présente le plus souvent sous forme de graphe ou diagramme d'analyse.

Les objectifs de l'utilisation de cet outil sont de recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions du produit. (7)

- **Recenser** : c'est déterminer et identifier les fonctions du produit.
- **Caractériser** : c'est énoncer les critères d'appréciation, les niveaux de flexibilité de ces fonctions.
- **Ordonner** : c'est classifier les fonctions en fonctions de service et en fonction techniques.
- **Hiérarchiser** : c'est évaluer l'ordre d'importance des fonctions retenues.
- **Valoriser** : c'est attribuer à chaque fonction un poids ou une valeur liée à son importance.

Nous utiliserons donc pour concevoir et analyser la performance du produit, l'analyse fonctionnelle dont les résultats attendue se matérialisent sous trois (3) formes d'illustration graphique qui sont :

- **La bête à cornes**, qui permet d'exprimer la recherche du besoin et identifier les fonctions de service d'un produit ;
- **La méthode APTE ou le diagramme pieuvre**, qui permet de définir les liens (c'est-à-dire les fonctions de service) entre le système et son environnement. Ce diagramme permet de recenser la plupart des fonctions du système ;

- **Le diagramme SADT (Strucured Analysis and Design Technique)**, qui permet une analyse structurée qui identifie et organise les détails d'un système qu'on veut appréhender suivant une hiérarchie de modèles parfaitement référencée.

2.5.1 Enoncé fonctionnel du besoin : Outil bête à cornes

Enoncer le besoin revient à exprimer l'exigence fondamentale qui justifie la conception du système. Cette approche est fondée sur la dématérialisation du système, c'est-à-dire sur la considération exclusive des satisfactions qu'il offre afin de combler le besoin latent du demandeur (8). Pour cela, on est amené à se poser les trois questions essentielles à savoir :

A qui, à quoi le système rend-il service ? Sur qui, sur quoi agit-il ? Dans quel but ? L'outil de représentation dit « bête à cornes » permet d'y répondre. Il est schématisé à la Figure ci-dessous : (7)

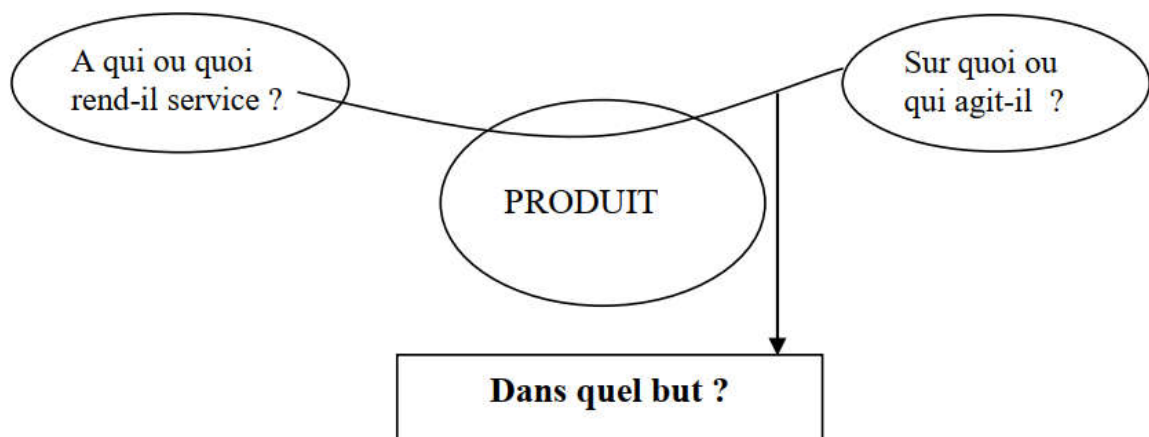


Figure 12: Diagramme bête à cornes

2.5.2 Analyse fonctionnel externe : Diagramme pieuvre

L'identification des fonctions est très importante dans une démarche de conception. En effet, les fonctions reflètent d'une part la description du besoin à remplir par le système et d'autre part, elles donnent des pistes d'orientation sur le choix des différents scénarios à analyser. Le système est donc considéré ici comme un agencement de fonctions et non comme un assemblage de solutions.

Pour définir les fonctions de notre système, nous utilisons l'outil de représentation dit « diagramme pieuvre ».

Ce diagramme représente le système entouré des **éléments extérieurs** en contact avec lui. Chaque fois que le système permet de mettre en relation deux éléments du milieu extérieur, il y a service rendu. Donc, en prenant tous les éléments du milieu extérieur **2 par 2**, chaque fois qu'il est possible d'exprimer un service rendu, il y a fonction principale (FP). Chaque fois qu'un élément du milieu extérieur exerce ou subit une action du système, il y a une fonction de contrainte (FC). (8)

Mise en œuvre :

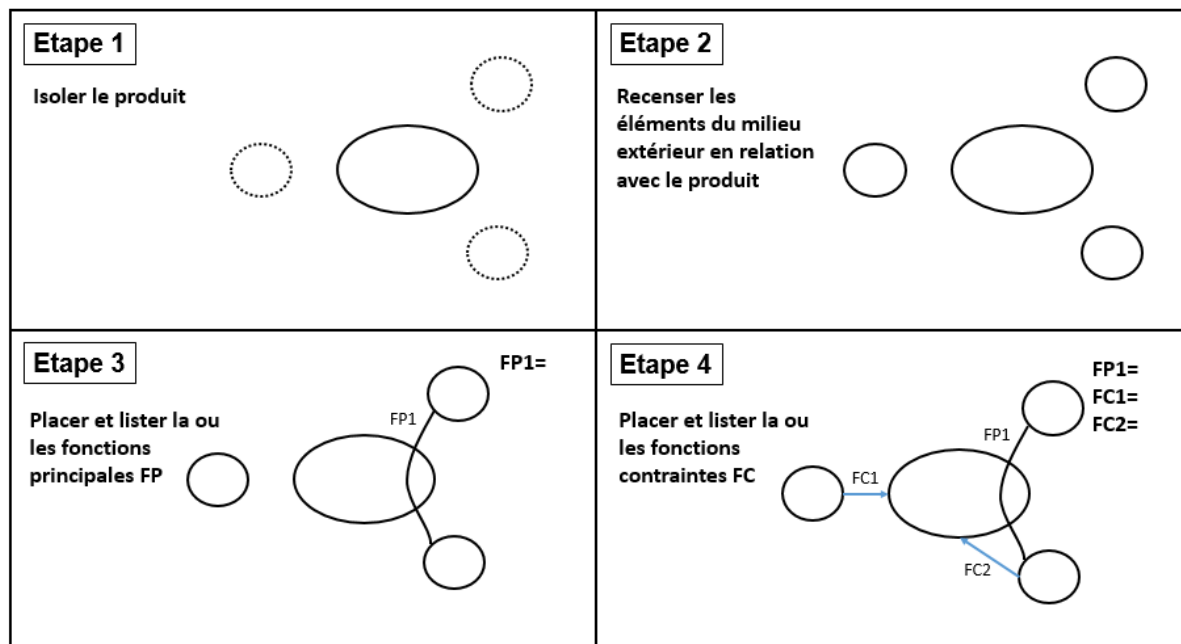


Figure 13: Illustration étape de mise en œuvre du diagramme pieuvre

2.5.3 Analyse fonctionnel interne : Diagramme SADT ou Actigramme

Principe: elle utilise des boîtes numérotées et des flèches codifiant les relations ou contraintes entre celles-ci.

Les données d'entrée (flèches arrivant côté gauche) sont transformées en données de sortie (flèches sortant côté droit) par la fonction indiquée dans la boîte. La sortie de chaque boîte peut devenir l'entrée ou le contrôle d'une ou plusieurs autres boîtes.

Les contrôles (flèches arrivant coté haut) indiquent les données et les paramètres régissant la transformation réalisée par la fonction.

Les mécanismes (flèches arrivant coté bas) précisent le support de la fonction: machine, appareil, moteur, capteurs.... (8)

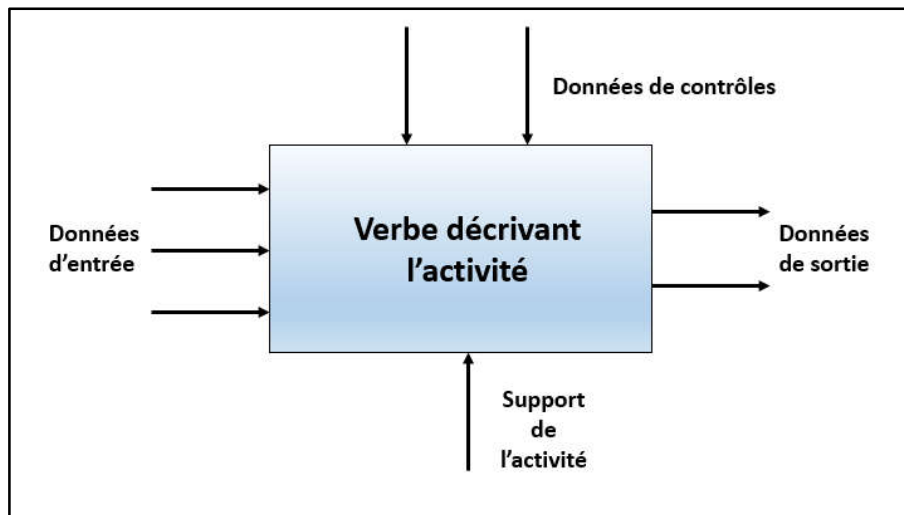


Figure 14: Actigramme

a) Niveau d'analyse (hiérarchie des diagrammes)

Le diagramme de plus haut niveau est noté A0 (A moins zéro) et représente l'ensemble du problème.

Le diagramme de niveau inférieur A0 se décompose en boîtes (A1 à An) donnant n diagrammes de niveau inférieur de même nom. De même A1 se décompose en plusieurs boîtes et niveaux A11, A12, etc. même remarque pour A2, A3....

Pour éviter la surabondance on utilise de 3 à 6 boîtes (au plus) par niveau, celles-ci sont toujours numérotées 1, 2, 3.... (8)

b) Démarche (décomposition d'un diagramme)

- Dessiner la boîte mère
- Décomposer la boîte mère: dessiner les sous-boîtes et les flèches
- Décomposer autant de fois que nécessaire

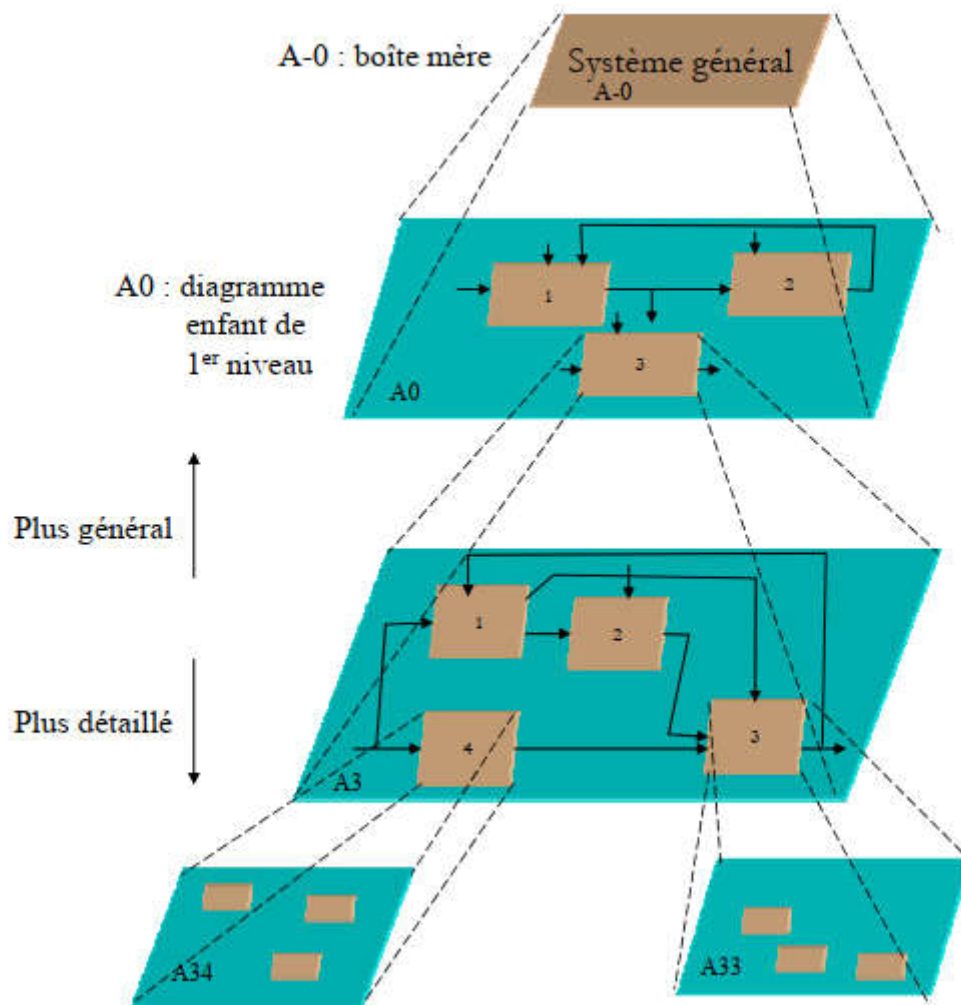


Figure 15: Démarche décomposition d'un diagramme

2.6 Analyse de la problématique

Cette analyse sera faite pour savoir les éventuels cause de non-qualité des produits obtenus à la fin du broyage.

2.6.1 Diagramme Ishikawa

Cet outil se présente sous la forme d'arêtes de poisson classant les catégories de causes inventoriées selon la loi des 5M :

- **Matière** : les différents consommables utilisés, matières premières...
- **Milieu** : le lieu de travail, son aspect, son organisation physique...
- **Méthodes** : les procédures, le flux d'information...
- **Matériel** : les équipements, machines, outillages, pièces de rechange...

- **Main d'œuvre** : les ressources humaines, les qualifications du personnel

Chaque branche reçoit d'autres causes ou catégories hiérarchisées selon leur niveau de détail. Le positionnement des causes met en évidence les causes les plus directes en les plaçant les plus proches de l'arête centrale. (8)

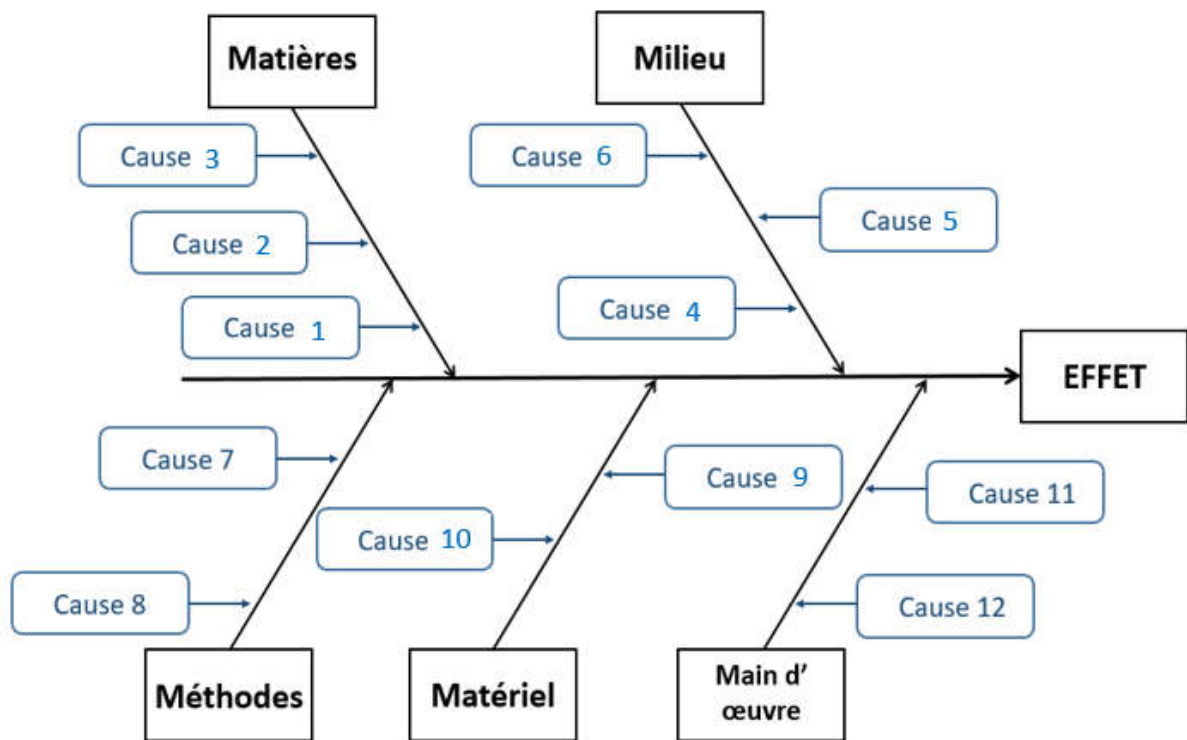


Figure 16: Structure du diagramme Ishikawa

2.6.2 Analyse FFOM

La méthodologie FFOM (Forces - Faiblesses – Opportunités - Menaces,) est un outil très pratique lors de la phase de diagnostic stratégique permettant de déterminer les options offertes dans un domaine d'activité stratégique. Il vise à préciser les objectifs du projet et à identifier les facteurs internes et externes favorables et défavorables à la réalisation de ces objectifs. Les forces et les faiblesses sont souvent d'ordre interne, tandis que les opportunités et les menaces se concentrent généralement sur l'environnement extérieur. (9)

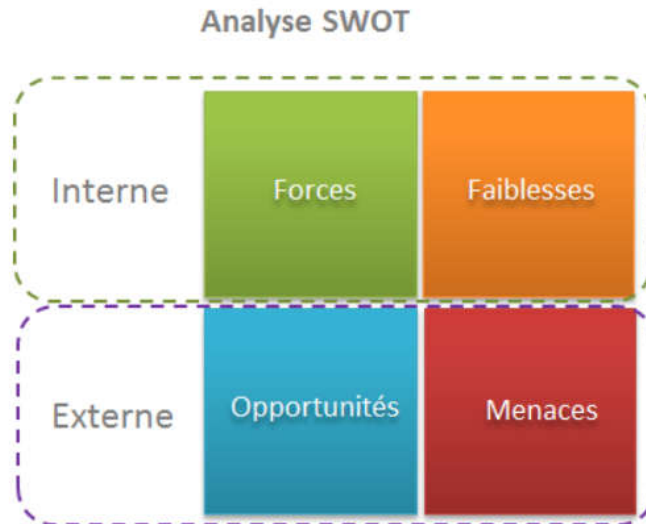


Figure 17: Illustration analyse FFOM

- **Force** : caractéristiques de l'entreprise ou du projet qui lui donnent un avantage sur les autres.
- **Faiblesses** : caractéristiques de l'entreprise qui désavantagent l'entreprise ou le projet par rapport aux autres.
- **Opportunités** : éléments de l'environnement que l'entreprise ou le projet pourrait exploiter à son avantage.
- **Menaces** : éléments de l'environnement qui pourraient causer des problèmes à l'entreprise ou au projet.

2.7 Conception et analyse de la machine (dimensionnement)

Quelques paramètres seront considérés dans la conception des composants de la machine :

- La facilité d'opération,
- L'aspect économique, dont l'utilisation des composants standards et disponibles sur le marché local.
- La capacité de production locale

La réalisation de la machine comme le monte la figure 43 consiste aux étapes suivantes :

(10) (11)

2.7.1 Analyse relative aux éléments de transmission du broyeur

La transmission par courroie est utilisée dans cette conception de par sa simplicité dans la conception et du cout réduit de fabrication.

2.7.2 Calcul de la vitesse de l'arbre

$$D_1 N_1 = D_2 N_2 \quad [1]$$

D_1 : Diamètre de la grande poulie [mm]

D_2 : Diamètre de la petite poulie [mm]

N_1 : Révolution de la grande poulie [tr/min]

N_2 : Révolution de la petite poulie [tr/min]

$$D_1 = \frac{D_2 N_2}{N_1} \quad [2]$$

Avec

Prenons, $N_2 = 3000$ rpm

$N_1 = 940$ tr/min

$D_2 = 90$ mm

$$D_1 = 287,23 \text{ mm}$$

On prendra, diamètre de la poulie menante de 300 mm et N_2 sera 3133.33 tr/min ;

2.7.3 Longueur nominale de courroie

Angle de contact

$$\sin^{-1} \beta = \frac{D_1 - D_2}{2E} \quad [3]$$

β : Angle de contact [Deg]

Avec $\beta = 0,16^\circ$

β petit,

$$L_C = 2E + \frac{\pi}{2}(D_1 + D_2) + \frac{(D_1 + D_2)^2}{4E} \quad [4]$$

L_C : Longueur de la courroie [mm]

E : Entraxe entre la poulie menant et la poulie menée [mm]

Tolérance sur l'entraxe

$$E_{max} = \text{entraxe nominal} + 3\% L \quad [5]$$

$$E_{min} = \text{entraxe nominal} - 1,5\% L \quad [6]$$

Distance entre les deux poulies est de 640 mm

Donc la longueur primitive de la courroie (L) est 1900 mm.

D'après le catalogue (Source : Guide des sciences et technologies industrielles, Jean louis fanchon) ; une courroie trapézoïdale classique B, 1850 Li serait adéquate.

2.7.4 Puissance transmise par l'arbre

Angle d'enroulement

$$\alpha_1 = 180 + 2\sin^{-1}\left(\frac{D_1 - D_2}{2E}\right) \quad [7]$$

$$\alpha_2 = 180 - 2\sin^{-1}\left(\frac{D_1 - D_2}{2E}\right) \quad [8]$$

α_1 : Angle d'enroulement de la grande poulie [Deg]

α_2 : Angle d'enroulement de la petite poulie [Deg]

Rapport entre les tensions T_1 et T_2 en tenant compte de la force centrifuge (courroie trapézoïdale)

$$\frac{T_2 - F_c}{T_1 - F_c} = e^{\left(\frac{\mu\alpha}{\sin\frac{\theta}{2}}\right)} \quad [9]$$

T_1 : Tension dans le brin mou [N]

$$\text{Avec } T_1 = S.A \quad [10]$$

S : Contrainte maximale admissible de la courroie [MN/m²]

A : Section de la courroie [m²]

La contrainte de sécurité admissible S est adoptée à 2,1 MN/m², l'épaisseur et la largeur de la courroie qui sont respectivement de 11 mm et 17 mm. Cela donne une tension sur le côté mou de la courroie T_1 comme 392,7 N.

T_2 : Tension dans le brin tendu [N]

μ : Coefficient de frottement

$\alpha = \alpha_1$: Arc d'enroulement sur la poulie menante [Rad]

θ : Angle des gorges [Rad]

$$F_c = M \cdot \omega^2 \quad [11]$$

F_c : Force centrifuge [N]

M : Masse par unité de longueur de la courroie (largeur \times épaisseur \times densité courroie) [N.m]

Pour le caoutchouc, densité égale à 1140 kg/m³

$$M = 0,21 \text{ kg/m}$$

ω : vitesse linéaire de la courroie

$$\omega = \frac{\pi N_1 D_1}{60} \quad [12]$$

$$\omega = 14765 \text{ mm/s}$$

Soit ω est égal à 14,77 m/s

Donc, $F_c = 46,5 \text{ N}$

$$T_2 = \frac{T_1 - F_c}{e^{\left(\frac{\mu \alpha}{\sin \frac{\theta}{2}}\right)}} \quad [13]$$

$$T_2 = 21,49 \text{ N}$$

Couple disponible au niveau de la poulie menée ou moment de torsion

$$M_t = (T_1 - T_2) \frac{D_2}{2} \quad [14]$$

M_t : Résultante de couple [Nm]

$$M_t = 16,7 \text{ Nm}$$

Puissance disponible au niveau de l'arbre

La relation permettant de déterminer la puissance disponible est donnée par la formule suivante

$$P = M_t \cdot \omega \quad [15]$$

P : Puissance transmis [W]

ω : Vitesse angulaire ; $\omega = \frac{2\pi N_2}{60}$ [rad/s]

$$P = 5479,62 \text{ W}$$

La puissance disponible au niveau de l'arbre étant plus petite que la puissance du moteur donc, deux (2) courroies seront utilisées pour la transmission de puissance de broyage.

2.7.5 Force centrifuge exercée par les marteaux

$$F_h = N_h m_h r_h \omega_h^2 \quad [16]$$

F_h : Force centrifuge exercée par les marteaux

N_h : Nombre de marteaux

ω_h : Vitesse angulaire du marteau [rad/s]

$$\omega_h = \frac{2\pi r N_2}{60} \quad [17]$$

m_h : Masse du marteau [kg]

r_h : Rayon du marteau [m]

Pour le marteau

$$m_h = \rho \cdot V_c \quad [18]$$

Où

ρ : Densité du matériau (pour l'acier = 7860 kg.m⁻³)

V_C : Volume des marteaux (dimensions 120 mm x 33 mm x 7 mm)

Chaque marteau a été percé au bout (trou de 12 mm), pour permettre son positionnement sur les axes sur le rotor.

Masse de chaque marteau est de 218 g, nombre de marteaux 18, dont la force centrifuge exercé par les marteaux est de :

$$F_h = 319,38 \text{ N}$$

2.7.6 Diamètre de l'arbre

Le moment de flexion maximum sera sur le marteau, pour une poutre supportée par des appuis simple avec charge uniformément répartie (Design Engineer's Handbook, Keith L. Richards) :

$$M_{b \max} = \frac{L^2 W}{8} \quad [19]$$

$M_{b \max}$: Moment de flexion maximum [Nm]

L : Longueur effective de l'arbre [m]

W : Force par unité de longueur [N/m]

La force par unité de longueur ;

$$W = \frac{F_h}{l} \quad [20]$$

Où $l = 0,15 \text{ m}$, longueur de charge uniformément répartie

$$M_{b \max} = 42,58 \text{ Nm}$$

La torsion de l'arbre de rotation est négligée dans le calcul de torsion rigide.

Le diamètre de l'arbre de rotation a été calculé à l'aide de la formule suivante :

L'équation du code ASME (American Society of Mechanical Engineers) pour les arbres pleins ayant ou pas de charge axiale est

$$d^3 = \frac{16}{\pi S_S} \sqrt{(K_b M_b)^2 + (K_t M_t)^2} \quad [21]$$

Où

d : Diamètre de l'arbre

S_S : Contrainte de cisaillement pour arbre

K_b : Choc combiné et facteur de fatigue appliqué au moment de flexion

K_t : Choc combiné et facteur de fatigue appliqué au moment de torsion

M_b : Moment de flexion [Nm]

M_t : Moment de torsion [Nm]

Les valeurs de K_b et K_t sont tous deux 3 pour la charge soudainement appliquée avec chocs intense sur l'arbre rotatif et la contrainte de cisaillement admissible de l'arbre S_S comme 40 MN.m^2 basé sur l'American Society of Mechanical Engineers (ASME).

Moment de flexion maximum étant trouvé $M_b = 42,58 \text{ Nm}$. Le moment de torsion étant $M_t = 16,7 \text{ Nm}$.

$$d^3 = \frac{16}{\pi \times 40.10^6} \sqrt{(3 \times 42,58)^2 + (3 \times 16,7)^2}$$

$$d^3 = 1,74.10^{-5}$$

$$d \geq 0,025 \text{ m}$$

En appliquant l'équation (21), le diamètre de l'arbre doit être supérieur ou égale à 25 mm.

Les caractéristiques dominantes d'un broyeur à marteaux sont résumées au sein du tableau 3 suivant. Relevant la puissance motrice requis à 6 kW.

2.7.7 Paramètres calculés du broyeur à marteaux

Tableau 3: Résultats des paramètres calculés du broyeur à marteaux

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Vitesse	N_2	3133,33	Tr/min
Longueur de la courroie	Li	1850	mm
	Le	1900	
Angle de contact	β	0,16	Degré
Angle d'enroulement de la poulie menante	α_1	180,16	Degré
Angle d'enroulement de la poulie menée	α_2	179,84	Degré
Angle des gorges	θ	40	Degré
Tension sur le brin mou de la courroie	T_1	392,7 N	N
Tension sur le brin tendue de la courroie	T_2	21,49	N
Couple transmis à l'arbre	M_t	16,7	Nm
Puissance disponible	P	5479,62	Watt
Force centrifuge exercée par les marteaux	F_h	319,38	N
Moment de flexion maximum	$M_{b\ max}$	42,58	Nm
Diamètre minimum de l'arbre	d	25	mm

2.7.8 Sélection des roulements

Deux paliers à semelles avec des roulements à une rangée de billes à contact radial devront faire l'affaire. De plus, ces roulements sont les plus utilisés.

2.7.9 Moteur électrique

Un moteur asynchrone triphasé (380 V), puissance 6,3 kW ou 8,13 chevaux à 940 tr/min est utilisé comme source d'énergie pour le broyeur à marteaux.

2.7.10 Ventilateur centrifuge

Relations entre les caractéristiques :

Pour un ventilateur donné et un circuit donné

- Le débit-volume Q est proportionnel à la vitesse de rotation,
- La variation de pression totale Δp produite est proportionnelle au carré de la vitesse et à la masse volumique,
- La puissance générée par le ventilateur P_V est proportionnelle au cube de la vitesse et à la masse volumique.

De façon plus générale, les points homologues des courbes caractéristiques d'une même famille de ventilateurs sont tels que:

- Le débit-volume est proportionnel à ND^3
- La variation de pression totale produite est proportionnelle à $\rho N^2 D^2$
- La puissance est proportionnelle à $\rho N^3 D^5$

D : Diamètre du rouet du ventilateur

N : Vitesse de rotation du ventilateur

ρ : Masse volumique du fluide véhiculé (Air)

$$D = 180 \text{ mm}$$

$$N = 3000 \text{ tr/min}$$

$$\rho = 1,292 \text{ kg. m}^{-3}$$

A.N:

$$Q = 0,29 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta p = 104,65 \text{ Pa}$$

$$P_V = 30,52 \text{ W}$$

D'après l'équation 22, le rendement mécanique du ventilateur est de

$$r = \frac{Q \times \Delta p}{P_V} \quad [22]$$

$$r = 0.99$$

Rendement mécanique 0,99 approximativement selon la grandeur et le types d'appareil.

2.7.11 Séparateur cyclonique

En général, cyclones de petits diamètres (à peu près 25 cm de diamètre) sont utilisés dans la pratique, parce qu'ils sont plus efficaces pour emporter les particules de taille relativement petite. (2)

D_c : Diamètre cyclone,

$$L = Z = 2D_c, \quad [23]$$

$$B = D_e = D_c/2 \quad [24]$$

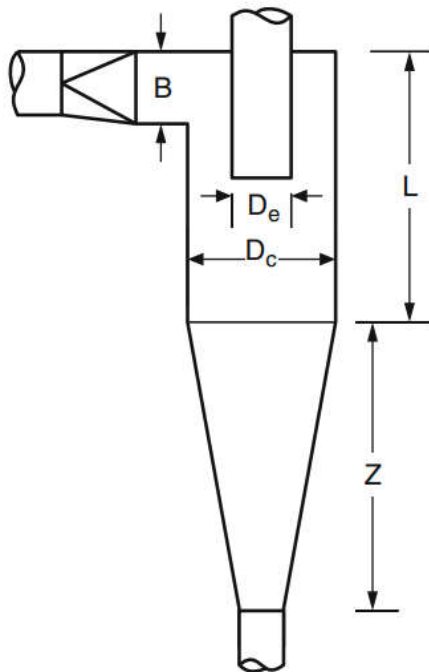


Figure 18: Dimension standard d'un cyclone

2.8 Procédure de test

Comme mentionné précédemment quatre (4) types de matières à broyer font l'objet d'étude dans ce travail, ces matières sont : maïs, manioc, riz et café.

Pour commencer, le manioc possède une spécificité car il nécessite une préparation préliminaire pour obtenir une taille adéquate pour la fragmentation. Cette préparation consiste à la mettre sous forme de cossette d'environ 5 à 7 mm d'épaisseur plus ou moins homogène.

Les éléments utilisés pour les tests de la machine peuvent être divisés en deux, qui sont les matériels à broyer (maïs, manioc, riz et café) et l'appareil de test. Les matériels sont du maïs, du riz, du café et du manioc, tandis que les appareils d'essai sont un chronomètre, une balance de pesée et des ensembles de tamis. Une quantité considérable d'échantillon de matériel à broyer a été introduite dans la chambre de broyage de la machine à travers la trémie d'alimentation. Le temps nécessaire pour fragmenter l'échantillon, c'est-à-dire les produits finis pour se décharger complètement a été noté. Le poids de l'échantillon broyé a été prélevé, après quoi l'échantillon broyé a été prélevé pour une analyse par tamisage pour séparer les produits finement broyés de l'échantillon grossièrement broyé. Le poids des échantillons fins et celui des échantillons grossiers ont été enregistrés en fonction des tailles de tamis.

Le processus a été répété pour chaque échantillon de matériel à fragmenter. Cette procédure a été utilisée pour les quatre matériels utilisés tels que présentés dans les résultats.

Et enfin, si l'analyse par tamisage s'avère concluante le processus s'arrête ici ; sinon, les échantillons supérieurs à 0,4 mm seront rebroyés.

Le but recherche dans ce travail sont de :

- Calculer et déterminer la capacité de broyage
- Efficacité de la machine
- Pertes pendant le broyage
- Distribution granulométrique

Capacité de broyage

$$\text{Capacité} = \frac{\text{masse moyenne du produit broyé (kg)}}{\text{temps moyen enregistré (h)}}$$

Détermination de l'efficacité de broyage

$$\text{Efficacité (\%)} = \frac{\text{masse du matériel à la sortie}}{\text{masse du matériel à l'entrée}} \times 100$$

Détermination des pertes

$$\text{Pertes} = \frac{M_b - M_a}{M_b}$$

M_b : Masse avant broyage [kg]

M_a : Masse après broyage [kg]

2.9 Détails de fabrication

- Coupe et mise en forme
- Assemblages soudés des tôles d'acier à l'arc électrique
- Assemblages des sous-ensembles au support par boulons, écrous et rondelles d'appui
- Liaisons arbre-moyeu par clavette
- Enduire de mastic
- Peindre avec de la peinture anticorrosion

2.10 Coupe et mise en forme des parties de la machine

2.10.1 Volume de la trémie

Le paramètre majeur régissant la taille et la configuration de la trémie d'alimentation est la capacité de débit de la machine. La trémie doit pouvoir contenir suffisamment de matière pour atteindre la capacité de débit souhaitée. Elle est de forme pyramidale et elle a été fabriquée à partir d'une tôle plane en acier de 2 mm d'épaisseur. Il était dimensionné avec une ouverture supérieure de 310×90 mm, une ouverture de base de 190×120 mm. La plaque a été marquée et coupée aux dimensions requises, puis soudée à l'arc électrique.

2.10.2 Marteaux

Une barre en acier de 7 mm d'épaisseur et de 33 mm de largeur a été coupée de 120 mm de longueur. Un trou de 12 mm a été percé au bas de chaque marteau, à l'aide d'un foret hélicoïdal, pour permettre sa mise en place sur le disque du rotor comme le montre la figure 17.

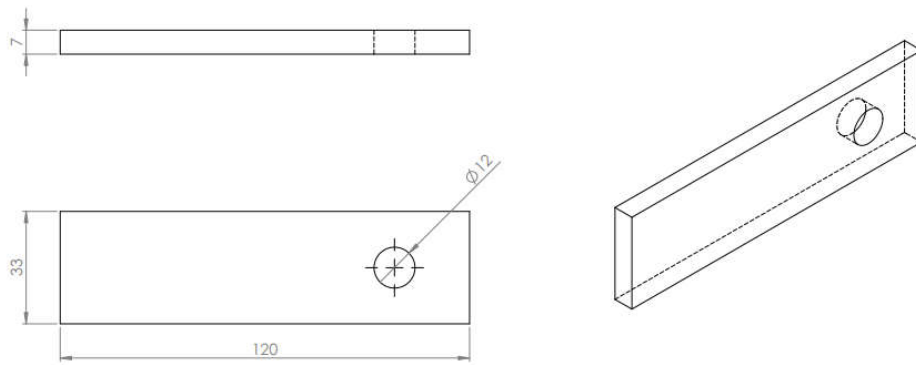


Figure 19: Représentation du marteau

2.10.3 Rotor

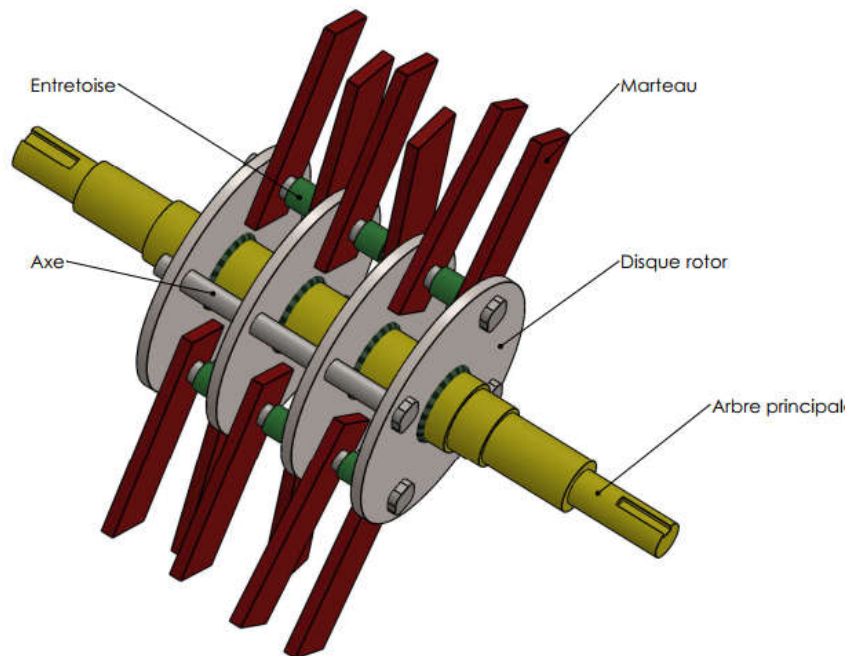


Figure 20: Schéma de l'arbre de transmission

Une tige de 40 mm de diamètre a été coupée et l'arbre a été produit par tournage sur un tour parallèle à une longueur de 400 mm, la rainure de clavette a été coupée dessus à l'aide d'une fraiseuse, avec 18 marteaux sur les disques du rotor, supportés par 4 axes et séparés les uns des autres par des entretoises. Les disques rotor et l'arbre principal ont été assemblés par soudure à l'arc électrique.

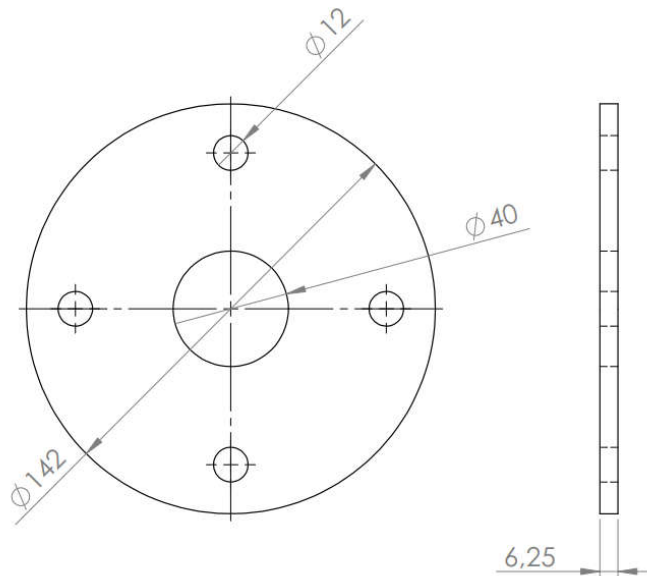


Figure 21: Illustration disque rotor

2.10.4 Plaque d'impact

Le plan d'impact sera le tamis et aussi à l'aide du contre-marteau situé sur la partie supérieure de la chambre de broyage.

2.10.5 Tamis

Pour disposer de la farine on achètera des tamis en acier doux aux diamètres de perforation 0,6 mm ; qui seront découpés à la dimension 475×180 mm et logé sur des rails ou chemin du tamis.

2.10.6 Chambre de broyage

Les tôles planes de 6 mm d'épaisseur en acier ont été marquées et découpées aux dimensions, puis soudées à l'arc électrique ensemble. Le logement de l'arbre principal sera meulé pour avoir une forme circulaire de 30 mm de diamètre.



Figure 22: Chambre de broyage

2.10.7 Bâti

Le bâti a été fabriqué à partir de structures en acier de section transversale angulaire (cornière) de 50 mm × 50 mm × 4 mm par soudage à l'arc. Les dimensions du cadre sont de 1000 mm de longueur, 300 mm de largeur. Le châssis supporte les deux parties du dispositif: le moteur électrique et le broyeur à marteaux. Des rainures permettront l'ajustement de l'ensemble en vue du réglage de la tension des brins des courroies.

2.10.8 Ventilateur centrifuge

a) Hélice

Nous choisirons de construire une roue à double plaque d'acier, les deux plaques seront découpées et percées ensemble pour assurer l'uniformité, la symétrie et pour faciliter l'assemblage comme le montre la figure 21. Les ailes et les plaques seront assemblées par rivet. Car il est important que la roue se balance parfaitement.

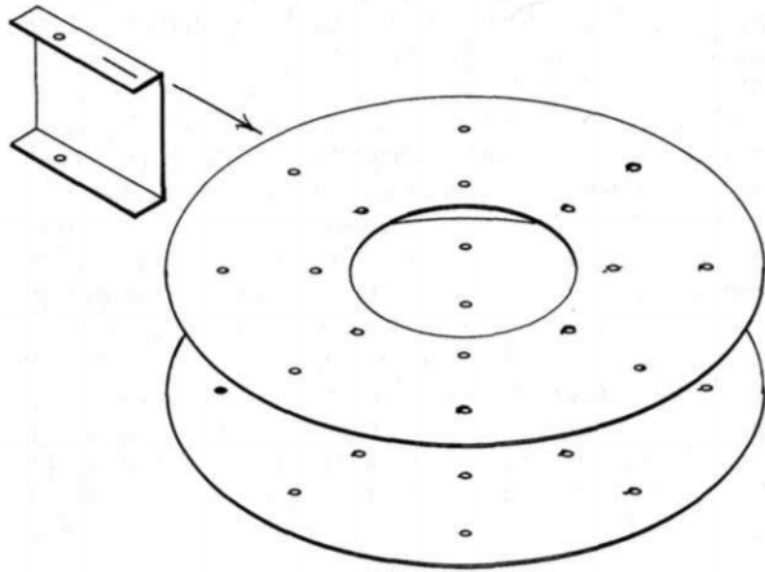


Figure 23: Illustration assemblage hélice

b) Volute du caisson

L'ensemble du travail de mise en page ou de positionnement sera effectué sur trois centres et trois rayons. La mise en page commence par une ligne horizontale, AB, coupée par une ligne verticale, CD, qui établit le centre O de la roue. Les centres supplémentaires O1 et O2 sont situés à 20 mm. Les deux autres centres O1 et O2 sont situés de part et d'autre du centre O, la distance de séparation étant de 10% du diamètre de la roue.

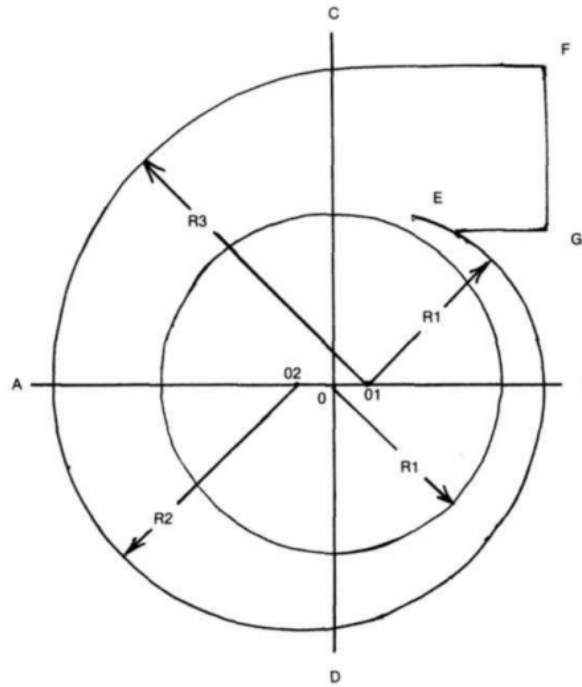


Figure 24: Mise en page de la volute du caisson

La prochaine étape consiste à dessiner le cercle au milieu qui représente la roue. R1 représente le rayon de la roue de lui-même, pour notre roue 180 mm. Avec le rayon R1 et le centre O, le cercle représentant la roue est tiré. Déplacer le compas sur O1 et en utilisant le rayon R1 encore un arc est tiré du point B passant le point E.

Ensuite, en se déplaçant vers le centre O2, le rayon R2 est utilisé pour dessiner un arc de B à D à A. La longueur du rayon R2 est la longueur de O2 à B.

Ensuite, prolongez l'arc de A à C en utilisant O1 comme centre. (12)

Une ligne horizontale est dessinée à partir de C environ 130 mm. Une ligne verticale est tirée du point F pour représenter la hauteur de l'ouverture de décharge. Dans ce cas, nous choisissons 125 mm pour la hauteur pour donner une ouverture de $125 \times 120 \text{ mm}^2$.

Enfin, une ligne est tracée du point G au point E à compléter la mise en page.

Les tôles planes en acier ont été coupées aux dimensions avant que chaque unité ne soit fabriquée par soudage à l'arc électrique.

2.10.9 Séparateur cyclonique

Le séparateur cyclonique est construit avec des cylindres et un cône plus un conduit rectangulaire pour la transition.

Des gabarits ont été utilisés et ensuite les tôles planes en acier sont découpées aux dimensions avant que chaque unité ne soit fabriquée par soudage à l'arc électrique.

La figure (23) montre un schéma du broyeur à marteaux de conception. De plus, la figure (25) montre la machine après la fabrication.

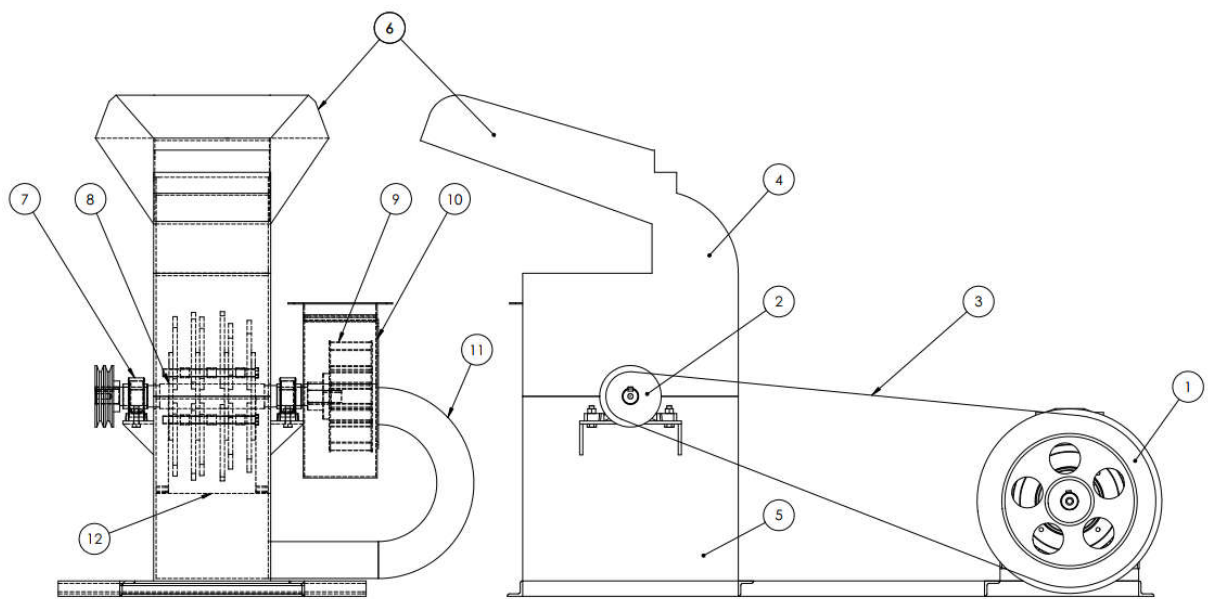


Figure 25: Schématique de conception du broyeur à marteaux

(1) Poulie menante ; (2) Poulie menée ; (3) Courroie ; (4) Partie supérieure chambre de broyage ; (5) Partie inférieure chambre de broyage ; (6) Trémie ; (7) Palier à semelle ; (8) Arbre rotor ; (9) Hélice ; (10) Caisson ; (11) Chemin d'aspiration ; (12) Tamis.

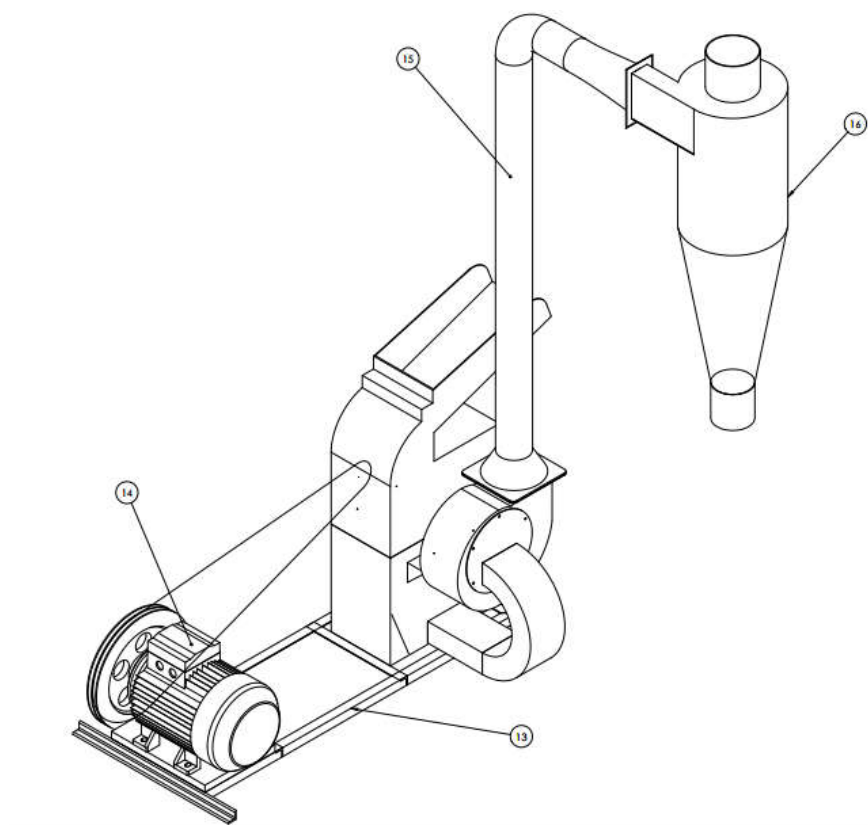


Figure 26: Schématisation de conception du broyeur à marteaux avec moteur et cyclone

(13) Bâti ; (14) Moteur électrique ; (15) Chemin de refoulement ; (16) Cyclone.



Figure 27: Image de la machine fabriquée

Résultats et discussions

3.1 Enoncé du besoin par l'outil bête à cornes

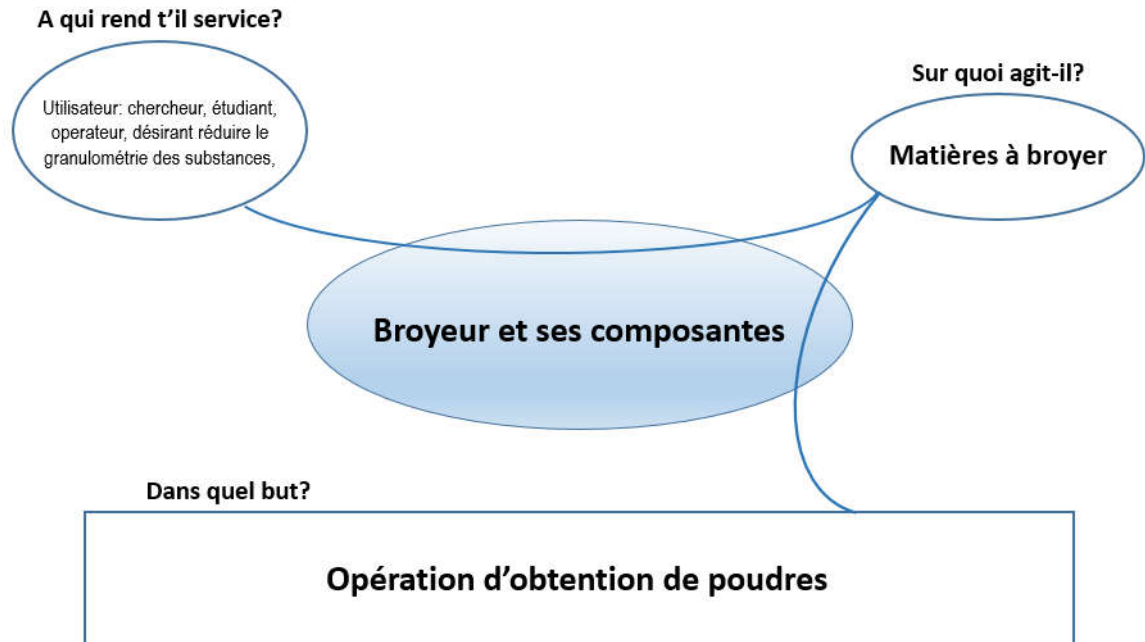


Figure 28: Diagramme bête à cornes du broyeur

Tableau 4: Contrôle de validation du besoin

Question	Réponses
Pourquoi le besoin existe-t-il ? <ul style="list-style-type: none"> • Dans quel but ? • Pour quelle(s) raison(s) ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Pour obtenir la farine en vue de la fabrication des produits dérivés, pour l'alimentation. • Permettre aux entreprises de transformation et aux particuliers à broyer des produits sec plus rapidement qu'avec les méthodes traditionnelles et machines couramment utilisées.
Qu'est ce qui pourrait le faire évoluer ?	Installation d'une unité automatisée (alimentation, vérification de la qualité du produit).
Qu'est ce qui pourrait le faire disparaître ?	Installation industrielle avec une grande capacité de production élevée.

3.2 Identification des fonctions par le diagramme Pieuvre

Connaissant le besoin précédemment énoncé par l'outil bête à cornes et tenant compte des spécifications de l'objectif de conception, nous construisons le diagramme pieuvre du broyeur.

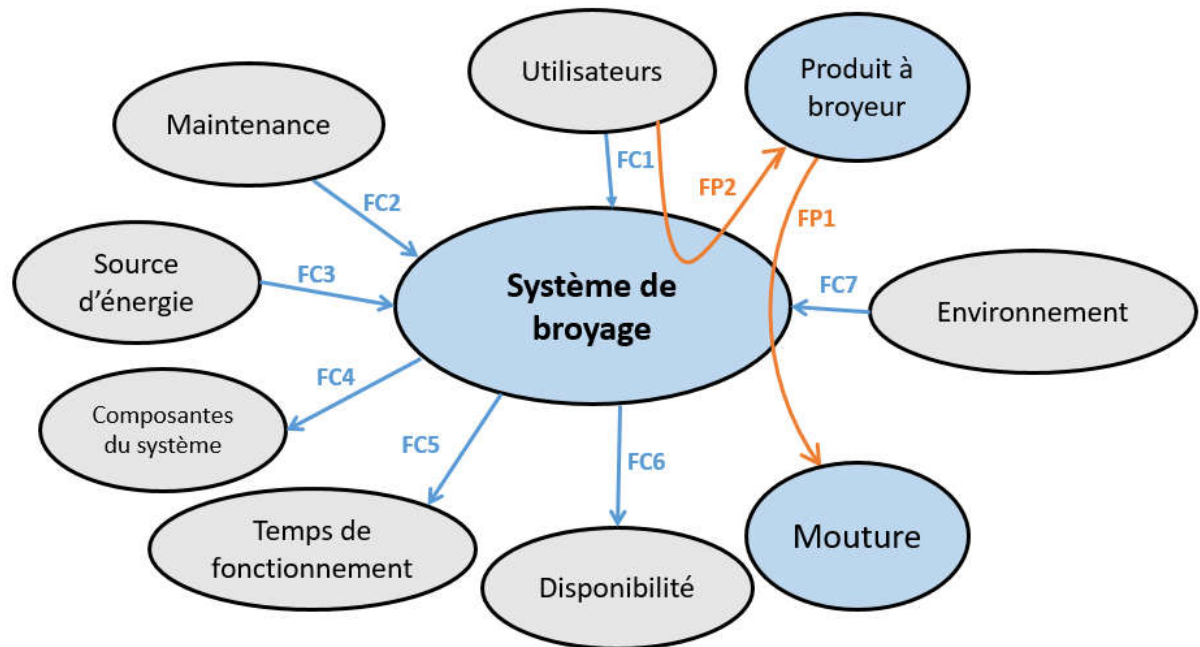


Figure 29: Illustration des interactions du système de broyage

On a recensé 2 fonctions principales qui mettent en évidence les fonctions primordiales de l'utilisation d'un broyeur qui mettent en relation, d'une part, la matière première avec le système et d'autre part le produit fini avec le système.

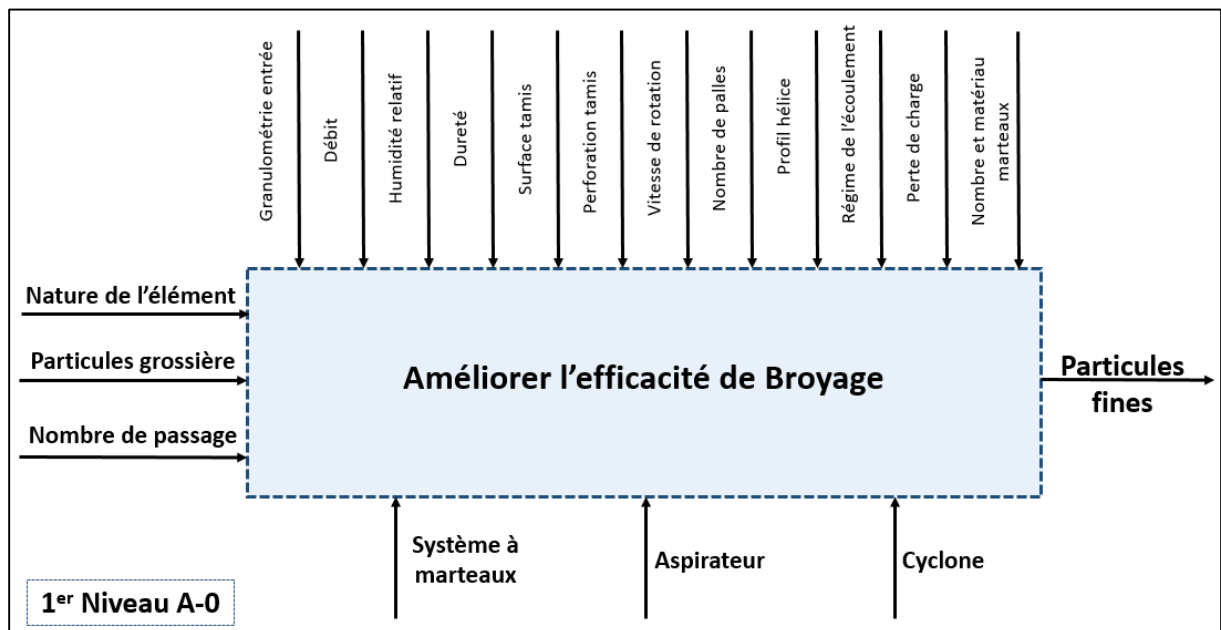
Les caractéristiques des fonctions de service sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5: Caractéristiques des fonctions de service.

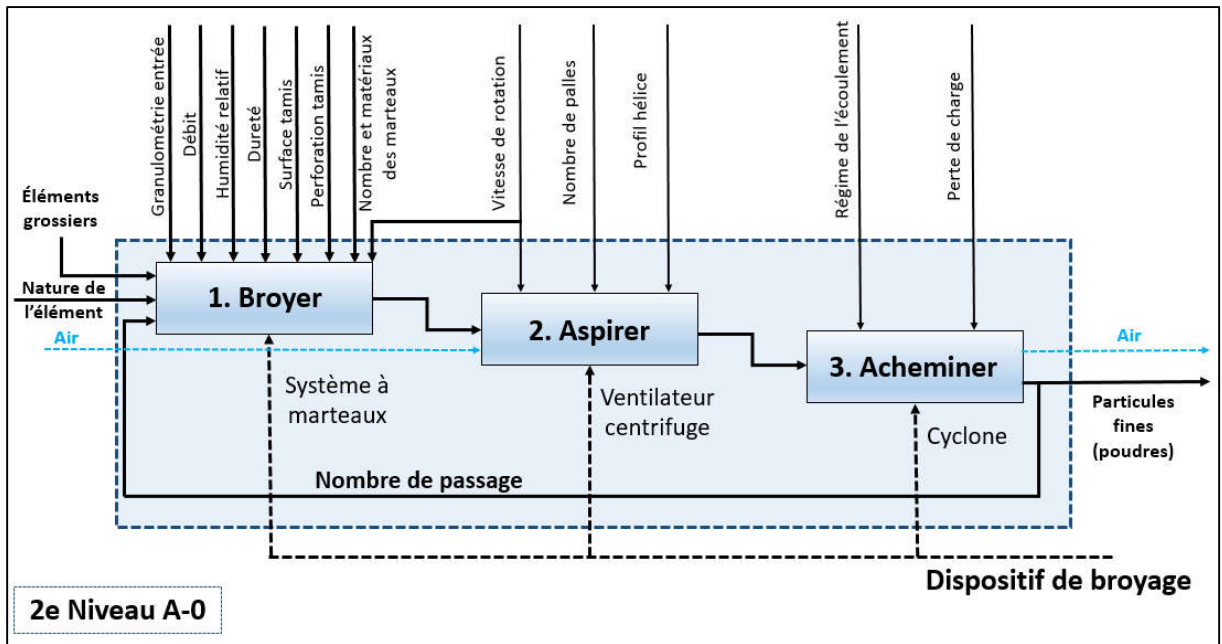
Fonction de service	Symbole	Description
Fonctions principales	FP1	Broyer plus rapidement et plus efficacement les produits sec afin d'obtenir de la mouture
	FP2	Contrôler le débit d'alimentation des produits à broyer

Fonctions contraintes	FC1	Etre facilement manipulable par l'utilisateur
	FC2	Etre facilement maintenable
	FC3	S'adapter à la source d'énergie disponible
	FC4	Etre disponible sur le marché
	FC5	Avoir une durée de fonctionnement maximale
	FC6	Utiliser des matériaux locaux
	FC7	Respecter l'environnement sociotechnique (bruit, poussière)

3.3 SADT



Au niveau A-0, l'actigramme met en évidence le processus de broyage en général. On y retrouve en bas les organes maitresse effectuant l'opération de broyage ; dans la partie supérieure de la boîte sont consignés les paramètres à suivre selon les critères de fonctionnement bien déterminés. A gauche et à droite de la boîte se trouvent l'état initial du matériel et son état après transformation.



Le second niveau de l'analyse met en avant plus de détail sur les paramètres qui influencent chaque composant du système en précisant où se réalise la fonction dans le dispositif de broyage, et les données de contrôle plus spécifique aux fonctions observées ; en vue de la maîtrise du processus de broyage à marteaux jusqu'à l'acheminement des produits obtenus.

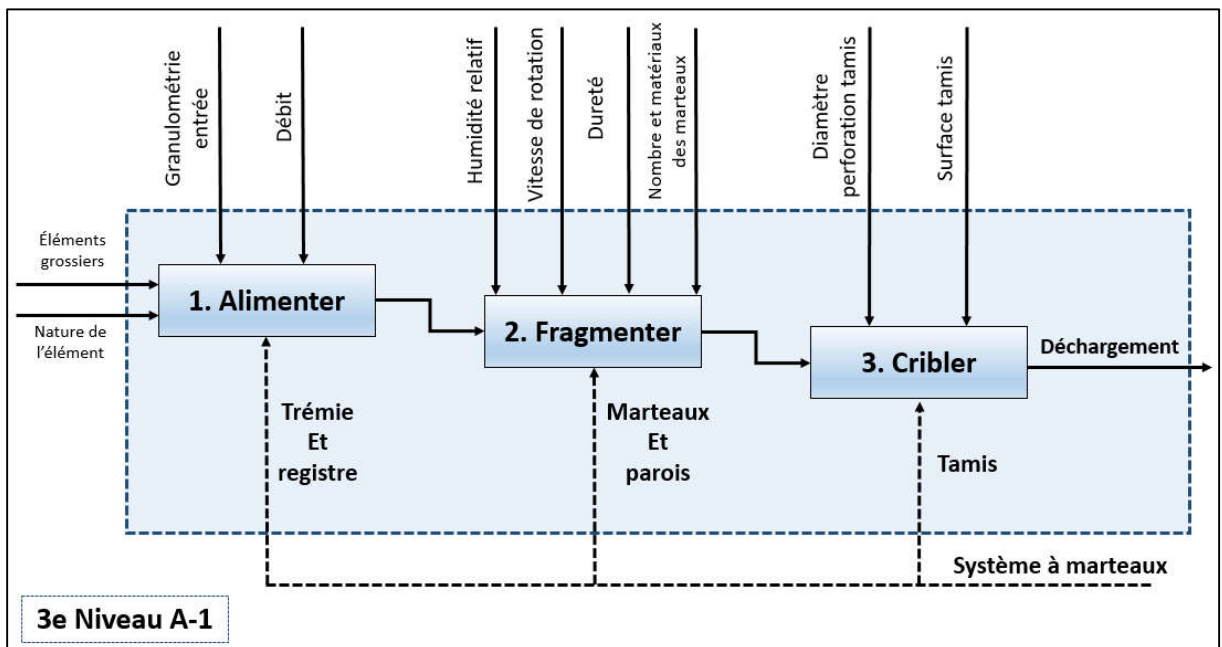


Figure 30: SADT

Le troisième niveau montre un aperçu détaillé des paramètres influençant les produits déchargés du système à marteaux.

- Le but de la SADT est d’offrir une vision globale et synthétique du système de broyage en ne retenant qu’un petit nombre d’informations jugé essentiel à la compréhension sous forme de modèle graphique appelé actigramme. Donc ces analyses détaillées conviennent parfaitement pour la modélisation des activités de broyage à marteaux du point de vue du concepteur.
- Les valeurs actuelles des données de notre analyse auront pour effet de comparaitre après les essais de broyage si les résultats seront satisfaisants en vue des objectifs attendus.
- La connaissance et le changement de ces données auront des impacts sur la qualité du produit désiré par l’utilisateur de la machine.

3.4 Résultats des expérimentations sur le broyage

3.4.1 Essais utilisant du maïs

6 kilos de maïs ont été introduits dans la trémie avec un débit d’alimentation de 1,2 kg/min. Le processus de broyage était noté. Le processus ayant été répété deux fois et la valeur moyenne est utilisée pour calcul. Les résultats suivants ont été obtenus lors des essais de broyage.

Tableau 6: Résultats tests utilisant le maïs

Essai	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de broyage (s)	Productivité (kg/h)	Efficacité
1	6000	5969	360	59,69	99,48%
2	6000	4728	360	47,28	78,80%
Moyenne	6000	5348,5	360	53,485	89,14%

Détermination des pertes étant de 10,85 %.

Les valeurs de l’analyse par tamisage sont présentées sur le tableau 7 et graphiquement représentées sur la figure 31.

Tableau 7: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de maïs

Taille du tamis (mm)	Masse moyenne retenue (g)	Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne passante (%)
1	1223,5	22,90	22,90	77,10
0,4	1551	29,03	51,93	48,07
< 0,4	2568,5	48,07	100	0

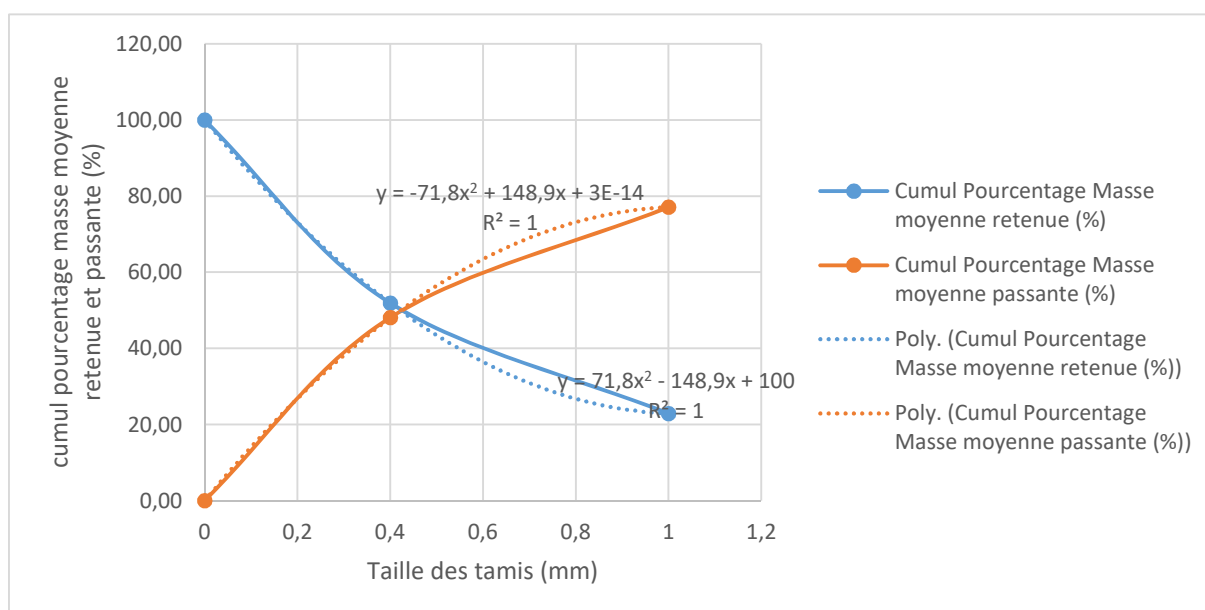


Figure 31: Graphique analyse par tamisage du cumul pourcentage masse retenue et passante pour les échantillons de maïs par rapport à la taille du tamis

Ainsi, le graphique du cumul pourcentage masse retenue / cumul pourcentage masse passante par rapport à la taille du tamis lors du broyage du maïs avec la machine fabriquée comme présenté dans la Figure 31 indique que la courbe du cumul pourcentage masse retenue intercepte la courbe du cumul pourcentage masse passante en un point à 0,42 mm ; 48% cumul masse de produit broyé passante étant conforme à la norme de qualité pour des produits alimentaires humaine tandis que 52% cumul masse d'échantillon sont encore retenus.

Pourcentage Masse moyenne retenue (%)

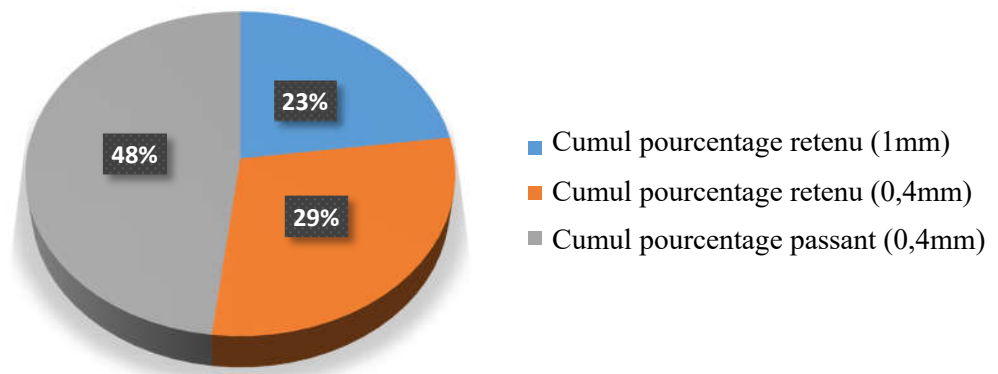


Figure 32: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du maïs

Dans la Figure 32, le graphique en secteur du cumul pourcentage masse retenue par rapport à la taille du tamis montre trois (3) granulométries différentes ; lors du broyage du maïs, le cumul de la masse moyenne d'échantillon retenue par le tamis 1mm est de 23%, la masse moyenne d'échantillon retenue par le tamis 0,4mm est de 29% et celle du fond de 48%.

Basé sur les résultats obtenus, on a pu constater que plus de la moitié des produits du maïs était retenue par les tamis de taille 0,4 mm et 1 mm. Donc, un deuxième passage de broyage sera nécessaire pour déterminer l'efficacité du broyeur à marteaux.

L'essai N°3 sera consacré aux produits retenus par le tamis de taille 1 mm et l'essai N°4 sera les produits retenus par le tamis de taille 0,4 mm.

Tableau 8: Résultats tests utilisant le maïs retenu par le tamis 1mm

Essai	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de broyage (s)	Productivité (kg/h)	Efficacité
3	2444	2158	270	28,77	88,30%

Détermination des pertes étant de 11,70 %.

Les valeurs de l'analyse par tamisage sont présentées sur le tableau 9 et graphiquement représentées sur la figure 33.

Tableau 9: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de maïs retenu par tamis 1mm

Taille du tamis (mm)	Masse moyenne retenue (g)	Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne passante (%)
0,4	780	36,15	36,15	63,85
< 0,4	1378	63,85	100	0

Pourcentage Masse moyenne (%)

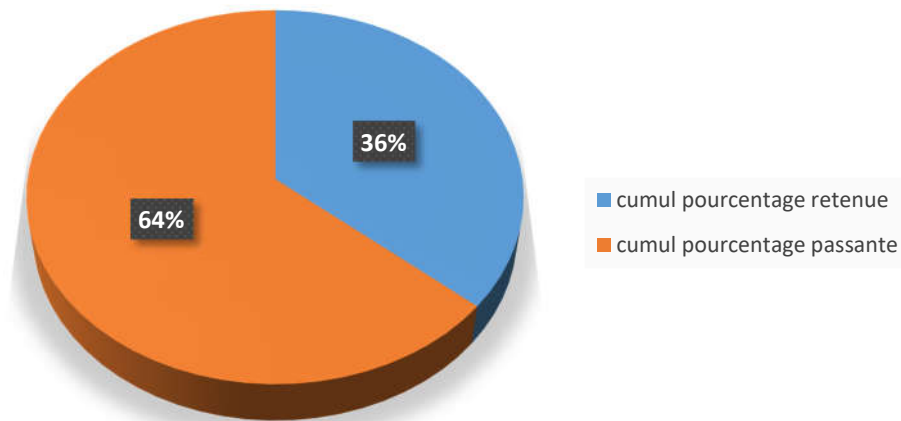


Figure 33: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du maïs retenu par tamis 1mm

Le graphique du cumul pourcentage masse retenue / cumul pourcentage masse passante par rapport à la taille du tamis 0,4 mm ; lors du broyage du maïs (granulométrie retenue par le tamis 1 mm), avec la machine fabriquée comme présenté dans la Figure 33, indique que 64% cumul masse de produit broyé passante étant conforme à la norme de qualité pour des produits alimentaires humaine tandis que 36% cumul masse d'échantillon sont encore retenus par tamis.

Tableau 10: Résultats tests utilisant le maïs retenu par le tamis 0,4mm

Essai	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de broyage (s)	Productivité (kg/h)	Efficacité
4	3371	2587	360	25,87	76,74%

Détermination des pertes étant de 23,25 %.

Les valeurs de l'analyse par tamisage sont présentées sur le tableau 11 et graphiquement représentées sur la figure 34.

Tableau 11: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de maïs retenu par tamis 0,4mm

Taille du tamis (mm)	Masse moyenne retenue (g)	Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne passante (%)
0,4	746	28,84	28,84	71,16
< 0,4	1841	71,16	100	0

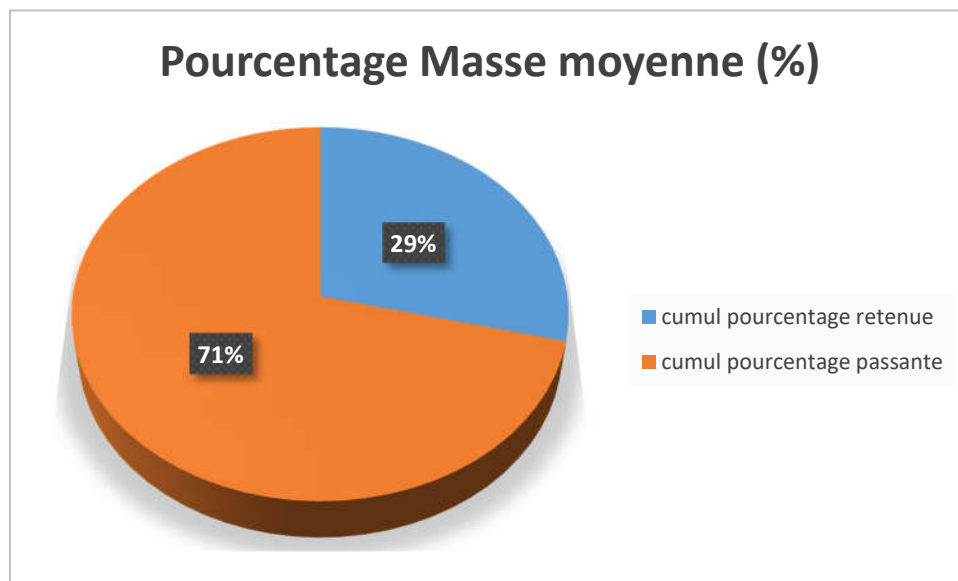


Figure 34: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du maïs retenu par tamis 0,4mm

Le graphique du cumul pourcentage masse retenue / cumul pourcentage masse passante par rapport à la taille du tamis 0,4 mm lors du broyage du maïs (granulométrie retenue par le tamis 0,4 mm), avec la machine fabriquée comme présenté dans la Figure 34, indique que 71% cumul masse de produit broyé passante sont conformes à la norme de qualité pour des produits alimentaires tandis que 29% cumul masse d'échantillon sont encore retenus par tamis 0,4mm.

3.4.2 Essais utilisant du manioc

2 kilos de manioc ont été introduits dans la trémie avec un débit d'alimentation de 1,5 kg/min. Le processus de broyage était noté. Le processus ayant été répété deux fois et la valeur moyenne est utilisée pour calcul. Les résultats suivants ont été obtenus lors des essais de broyage.

Tableau 12: Résultats tests utilisant le manioc

Essai	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de broyage (s)	Productivité (kg/h)	Efficacité
1	2000	1739	120	52,17	86,95%
2	2000	1824	120	54,72	91,20%
Moyenne	2000	1781,5	120	53,445	89,08%

Détermination des pertes étant de 10,92 %.

Les valeurs de l'analyse par tamisage sont présentées sur le tableau 13 et graphiquement représentées sur la figure 35.

Tableau 13: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de manioc

Taille du tamis (mm)	Masse moyenne retenue (g)	Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne passante (%)
1	260,5	14,62	14,62	85,38
0,4	236,5	13,28	27,90	72,10
< 0,4	1284,5	72,10	100	0

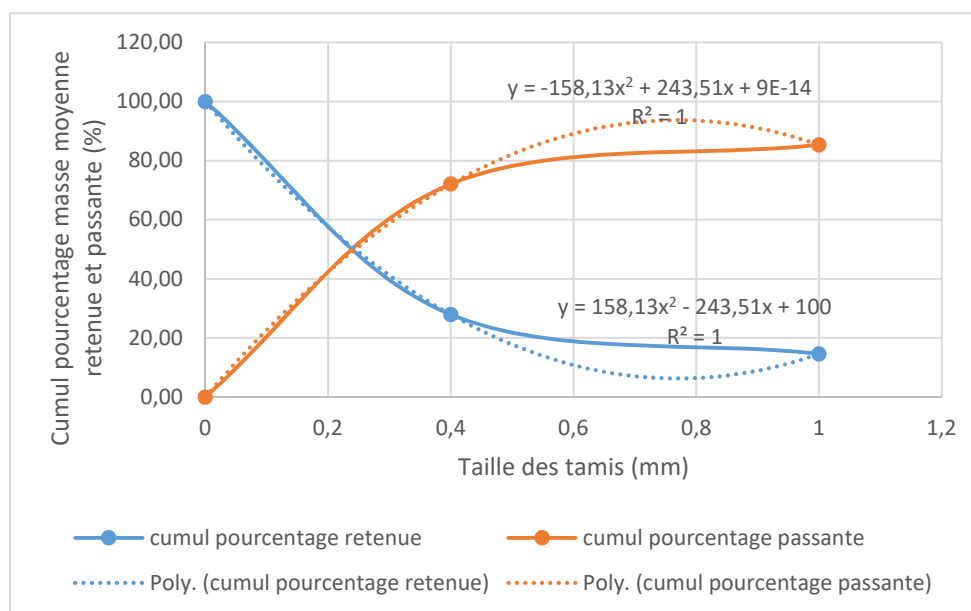


Figure 35: Graphique analyse par tamisage du cumul pourcentage masse retenue et passante pour les échantillons de manioc par rapport à la taille du tamis

Ainsi, le graphique du cumul pourcentage masse retenue / cumul pourcentage masse passante par rapport à la taille du tamis lors du broyage du manioc avec la machine fabriquée, présenté dans la Figure 35, indique que la courbe du cumul pourcentage masse retenue intercepte la courbe du cumul pourcentage masse passante en un point à 0,24 mm et 72% cumul masse de produit broyé passante sont conformes à la norme de qualité pour des produits alimentaires humaine tandis que 28% cumul masse d'échantillon sont encore retenus.

Pourcentage Masse moyenne (%)

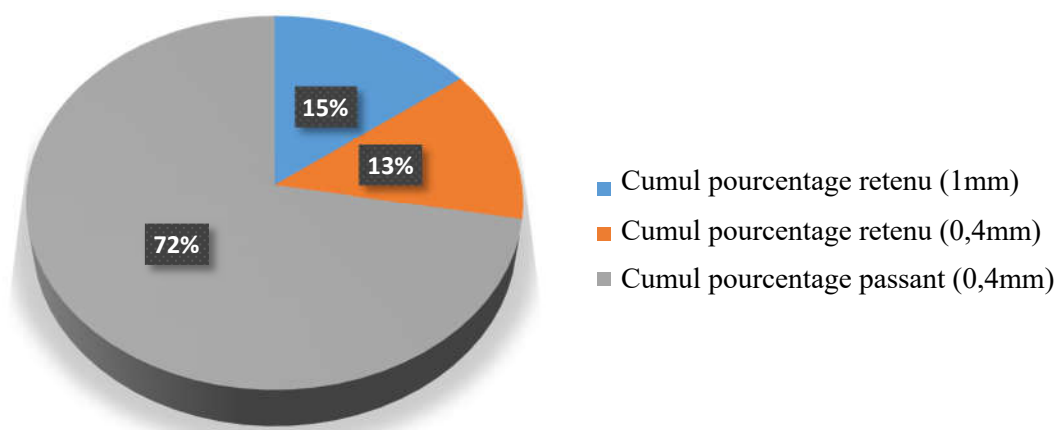


Figure 36: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du manioc

Dans la Figure 36 le graphique en secteur du cumul pourcentage masse retenue par rapport à la taille du tamis montre trois (3) granulométries différentes ; lors du broyage du manioc, le cumul de la masse moyenne d'échantillon retenue par le tamis 1mm est de 15%, la masse moyenne d'échantillon retenue par le tamis 0,4mm est de 13% et celle du fond de 72%.

Pour plus de paramètre nous avons aussi broyé l'écorce du manioc.

Essai	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de broyage (s)	Productivité (kg/h)	Efficacité
3	1133	981	60	58,86	86,58%

Détermination des pertes étant de 13,41 %.

3.4.3 Essais utilisant du riz

6 kilos de riz ont été introduits dans la trémie avec un débit d'alimentation de 1,2 kg/min. Le processus de broyage était noté. Le processus ayant été répété deux fois et la valeur moyenne est utilisée pour calcul. Les résultats suivants ont été obtenus lors des essais de broyage.

Tableau 14: Résultats tests utilisant le riz

Essai	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de broyage (s)	Productivité (kg/h)	Efficacité
1	6000	5224	360	52,24	87,07%
2	6000	5688	360	56,88	94,80%
Moyenne	6000	5456	360	54,56	90,93%

Détermination des pertes étant de 9,06 %.

Les valeurs de l'analyse par tamisage sont présentées sur le tableau 15 et graphiquement représentées sur la figure 37.

Tableau 15: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de riz

Taille du tamis (mm)	Masse moyenne retenue (g)	Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne passante (%)
0,4	2558	46,88	46,88	53,12
< 0,4	2898	53,12	100	0

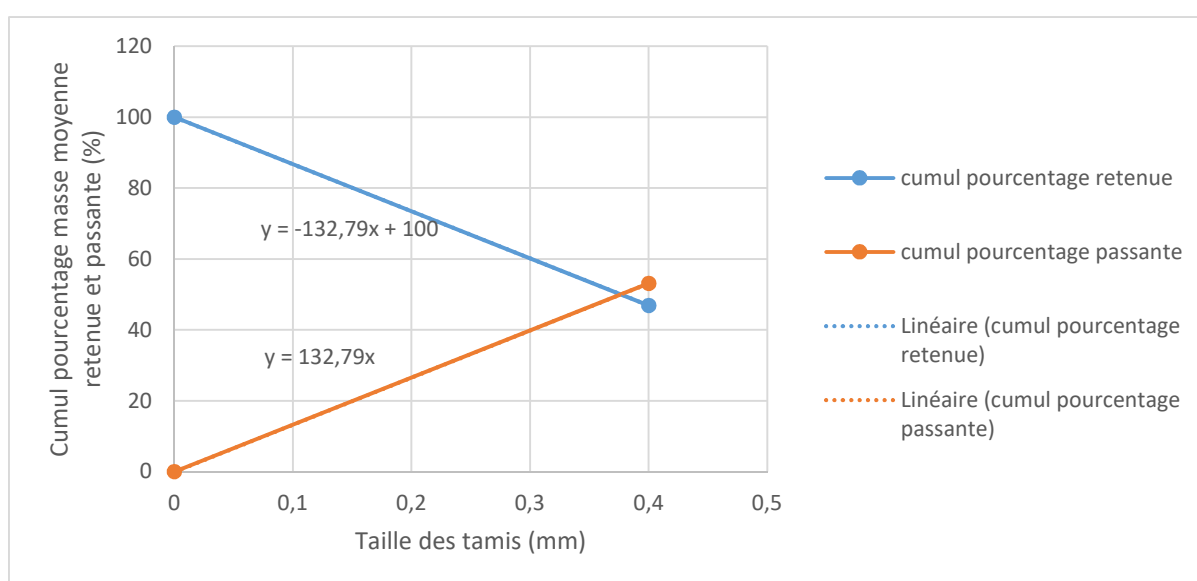


Figure 37: Graphique analyse par tamisage du cumul pourcentage masse retenue et passante pour les échantillons de riz par rapport à la taille du tamis

Ainsi, le graphique du cumul pourcentage masse retenue / cumul pourcentage masse passante par rapport à la taille du tamis lors du broyage du riz, avec la machine fabriquée comme présenté dans la Figure 37, indique que la courbe du cumul pourcentage masse retenue intercepte la courbe du cumul pourcentage masse passante en un point à 0,37 mm et 53% cumul masse de produit broyé passante sont conformes à la norme de qualité pour des produits alimentaires humaine tandis que 47% cumul masse d'échantillon sont encore retenus.

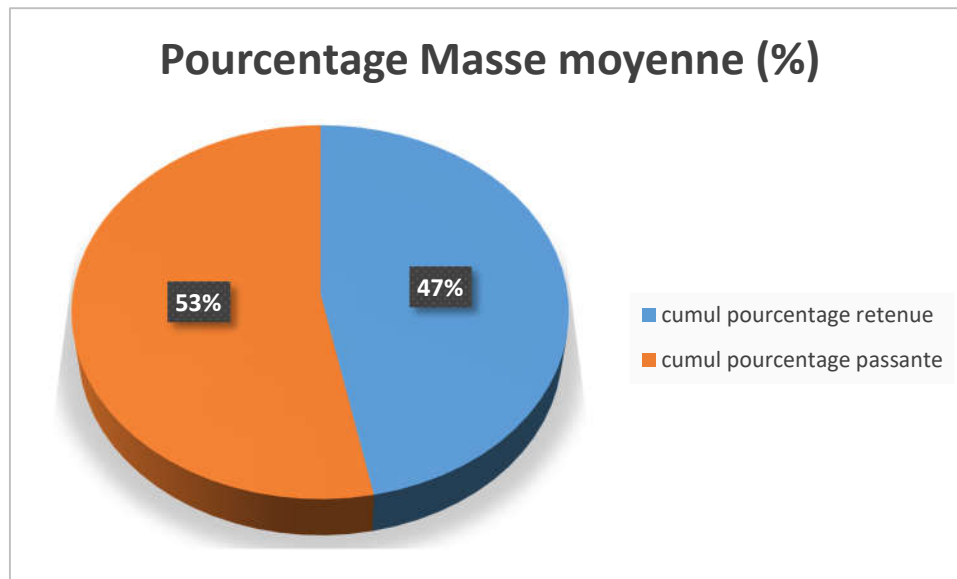


Figure 38: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du riz

Dans la Figure 38 le graphique en secteur du cumul pourcentage masse retenue par rapport à la taille du tamis montre deux (2) granulométries différentes ; lors du broyage du riz, cumul de la masse moyenne d'échantillon retenue par le tamis 0,4 mm est de 53%, la masse moyenne d'échantillon du fond étant de 47%.

3.4.4 Essais utilisant du café

2 kilos de café ont été introduits dans la trémie avec un débit d'alimentation de 1,2 kg/min. Le processus de broyage était noté. Le processus ayant été répété deux fois et la valeur moyenne est utilisée pour calcul. Les résultats suivants ont été obtenus lors des essais de broyage.

Tableau 16: Résultats tests utilisant le café

Essai	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de broyage (s)	Productivité (kg/h)	Efficacité
1	2000	1558	180	31,16	77,90%
2	2000	1776	180	35,52	88,80%
Moyenne	2000	1667	180	33,34	83,35%

Détermination des pertes étant de 16,65 %.

Les valeurs de l'analyse par tamisage sont présentées sur le tableau 17 et graphiquement représentées sur la figure 39.

Tableau 17: Valeurs de l'analyse par tamisage moyen des échantillons de café

Taille du tamis (mm)	Masse moyenne retenue (g)	Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne retenue (%)	Cumul Pourcentage Masse moyenne passante (%)
0,4	201	12,06	12,06	87,94
< 0,4	1466	87,94	100	0

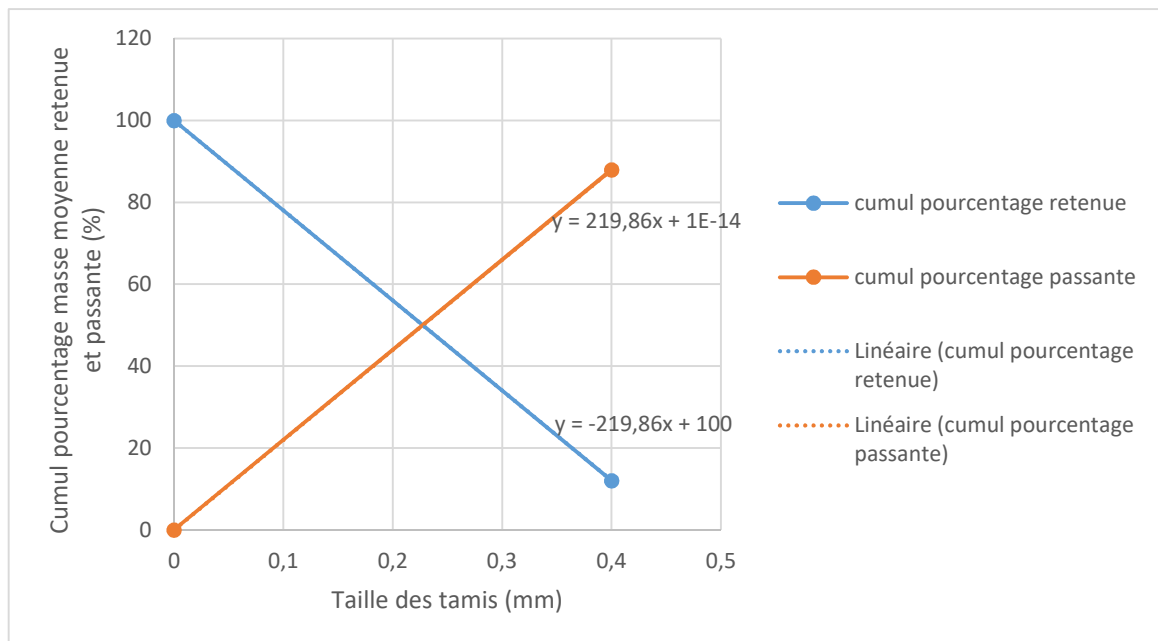


Figure 39: Graphique analyse par tamisage du cumul pourcentage masse retenue et passante pour les échantillons du café par rapport à la taille du tamis

Ainsi, le graphique du cumul pourcentage masse retenue / cumul pourcentage masse passante par rapport à la taille du tamis lors du broyage du café, avec la machine fabriquée comme présenté dans la Figure 37, indique que la courbe du cumul pourcentage masse retenue intercepte la courbe du cumul pourcentage masse passante en un point à 0,22 mm et 88% cumul masse de produit broyé passante sont conformes à la norme de qualité pour des produits alimentaires humaine tandis que 12% cumul masse d'échantillon sont encore retenus.

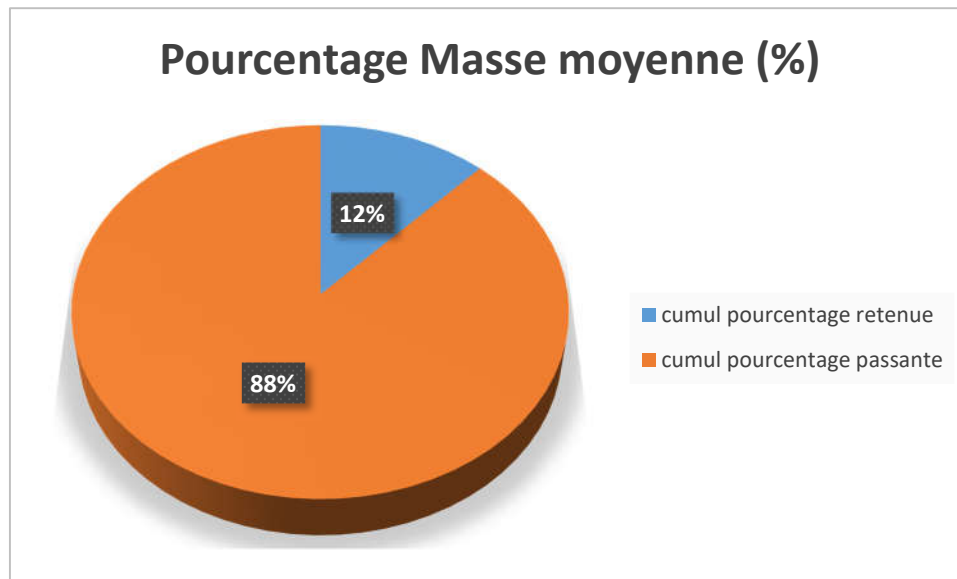


Figure 40: Graphique en secteur de l'analyse par tamisage du café

Le graphique en secteur du cumul pourcentage masse retenue / cumul pourcentage masse passante par rapport à la taille du tamis lors du broyage de café, avec la machine fabriquée comme présenté dans la Figure 40, montre deux (2) granulométries différentes et indique que 12% cumul masse d'échantillon sont retenue par le tamis 0,4mm et la masse moyenne d'échantillon passante du fond étant de 88%.

➤ Lors de la fragmentation du maïs et du manioc on a obtenu trois (3) granulométries différentes par analyse tamisage tandis que deux (2) seulement sont observées lors de la fragmentation du riz et du café, ce qui explique l'allure des courbes.

➤ Les produits obtenus ont été bien broyés si l'interception des courbes cumuls pourcentage masse retenue / cumuls pourcentage masse passante est entre 0 à 0,4 de la taille du tamis.

➤ Basé sur les résultats obtenus, les conclusions suivantes ont été tirées des tests effectués et mentionnés précédemment l'efficacité moyenne du maïs, du manioc, du riz et du café sont respectivement 89,4% – 89,08% – 90,93% et 83,35% donc l'efficacité du broyeur à marteaux en général sera de 88,19%. L'évaluation de performance donne la capacité de broyage variant de 25 à 55 kg/h. Il est clair que la capacité de broyage et l'efficacité de la machine sont satisfaisantes vis-à-vis des objectifs attendus ; tandis que les pertes enregistrées sont dues au colmatage des particules fines sur les parois du système.

➤ On peut dire que notre système est amplement approprié pour le broyage du café et du manioc sec ; et de même recommandé pour le broyage du riz et du maïs.

3.5 Analyse de coût

3.5.1 Coût matériel

Tableau 18: Coût matériel

Désignation	Observation	Dimension (mm)	Pcs	Prix Unitaire (Ar)	Prix Total (Ar)
Arbre diamètre 45	Acier non allié C22	L=400	1	40 000,00	40 000,00
Axe diamètre 12	Acier	L=2000	2	7 500,00	15 000,00
Baguette ordinaire	Soudure à l'arc				30 000,00
Boulons à serrage	Assemblage	M16x100	1	5 000,00	5 000,00
Boulons à serrage	Assemblage	M10x40	6		10 000,00
Boulons à serrage	Assemblage	M12x50	8		13 000,00
Cornière	Bâti	50x50x3x3000	1	35 000,00	35 000,00
Coude			1	25 000,00	25 000,00
Courroie	17x1850		2	11 000,00	22 000,00
Disque meule	Coupe et meulage		1	4 000,00	4 000,00
Disque meule	Coupe et meulage		3	3 500,00	10 500,00
Barre en acier	Epaisseur 4mm	2200x25	1	20 000,00	20 000,00
Goupille	Assemblage		10	1 000,00	10 000,00
Marteaux broyeur			18		30 000,00
Papier verre	finition		1	10 000,00	10 000,00
Peinture, diluent, mastic					60 000,00
Poulie	diamètre 100, 2 gorges		1	25 000,00	25 000,00
	diamètre 300, 2 gorges		1	90 000,00	90 000,00
Rondelles	Assemblage		13		9 500,00

TPN	Chambre de broyage	1000x600x4	1	65 000,00	65 000,00
	Trémie	1000x350x4	1	50 000,00	50 000,00
	Volute (Ventilateur centrifuge)	1000x1000x2	1	15 000,00	15 000,00
Tôle en acier (rotor)	Epaisseur 6 mm		1	20 000,00	20 000,00
Tuyau diamètre 80	2 mètre	L=2000	2	31 000,00	62 000,00
Palier à semelle			2	50 000,00	100 000,00
				TOTAL	776 000,00

3.5.2 Coût du travail

Tableau 19: Coût du travail

Désignation	Observation	Prix total (Ar)
Coût électricité	JIRAMA	50 000,00
Main d'œuvre	Coupe	60 000,00
Main d'œuvre général	Assemblage	469 000,00
Main d'œuvre	Mastic & peinture	30 000,00
Main d'œuvre	Finition (mastic & peinture)	40 000,00
Usinage arbre	Tournage Chariotage Dressage	40 000,00
Usinage arbre	Rectification Fraisage logement de clavette Alésage, taraudage	25 000,00
Usinage moyeu hélice	Tournage	10 000,00
TOTAL		736 000,00

3.5.3 Frais généraux

Coût matériel + Coût de travail = Frais généraux

Donc les frais généraux de notre projet est de 1 512 000 Ariary, sans compter le prix du moteur.

3.5.4 Comparaison des coûts, de la puissance et de la productivité

La comparaison des coûts sera faite à partir des différents types de broyeur existant sur le marché ; en tenant aussi compte de la puissance et de la productivité. Car l'objectif est de fabriquer un broyeur à marteaux et de comparer l'efficacité avec une machine standard disponible. (13)

Tableau 20: Coût des broyeurs existant sur le marché

Rang	Libellé	Coût (MAr)	Puissance (KW)	Productivité (kg/j)
1	Mortier et pilon manuel	0,015	0,075	120
2	Mortier et pilon mécanisé	0,7	0,075	150
3	Broyeur à disques	1	3	720
4	Moulin motorisé électriquement	1,5	3	250
5	Broyeur à marteaux fabriqué	2	6,3	440
6	Broyeur à marteaux	4	7	1 600
7	Moulin motorisé à motocyclette	7,5	1,5	400
8	Broyeur à boulets	9	10	4 000
9	Broyeur à cylindres lisses ou cannelés	60	15	10 000

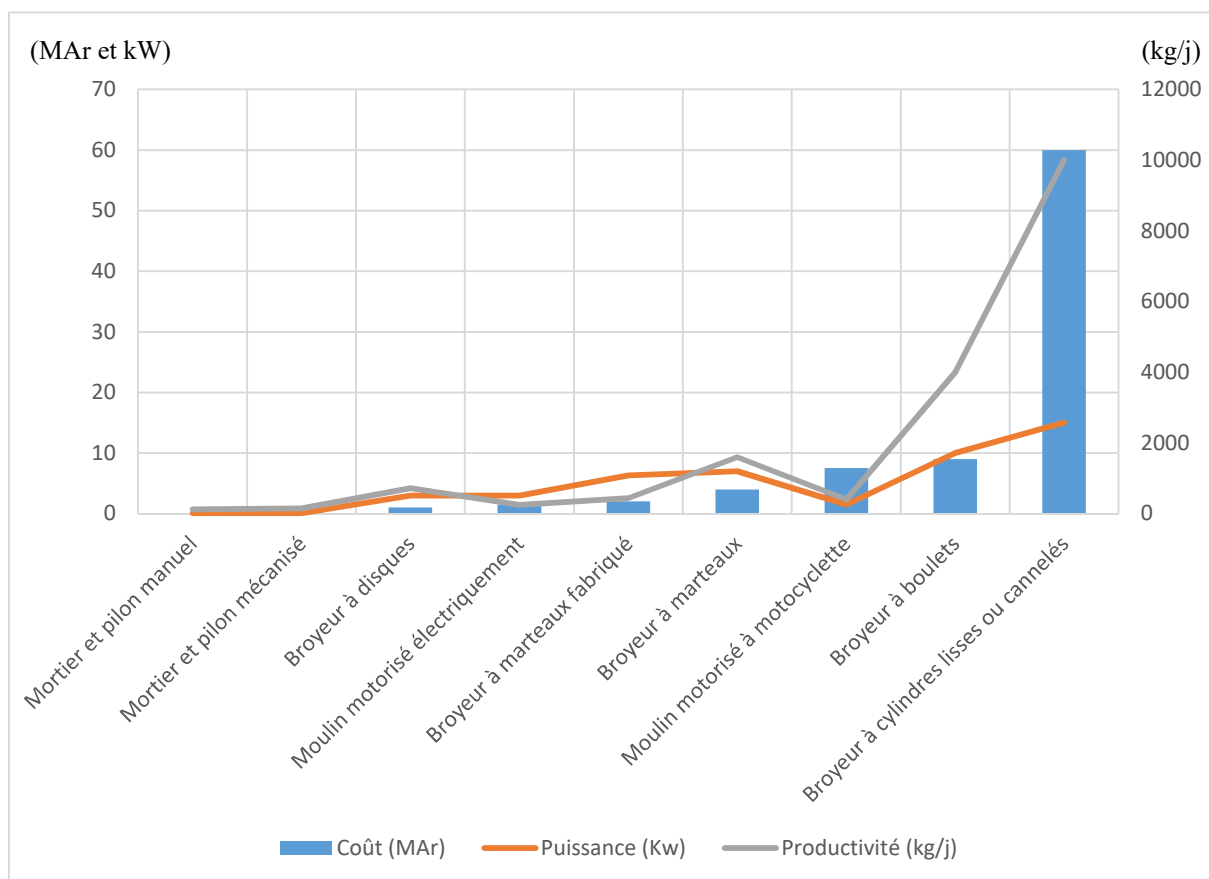


Figure 41: Graphique de comparaison de coût par rapport à la puissance et la productivité

On a pu constater que notre système de broyage est deux fois moins cher qu'un broyeur du même type ; plus performante en terme de capacité par rapport au système traditionnel et mécanisé ; et ayant aussi un bon rapport puissance / productivité.

3.6 Diagramme Ishikawa

Cette forme de présentation et d'analyse permet de visualiser les causes, réelles ou supposées pouvant provoquer un effet de non-qualité que l'on cherche à comprendre au fur et à mesure de l'emploi du broyeur à marteaux.

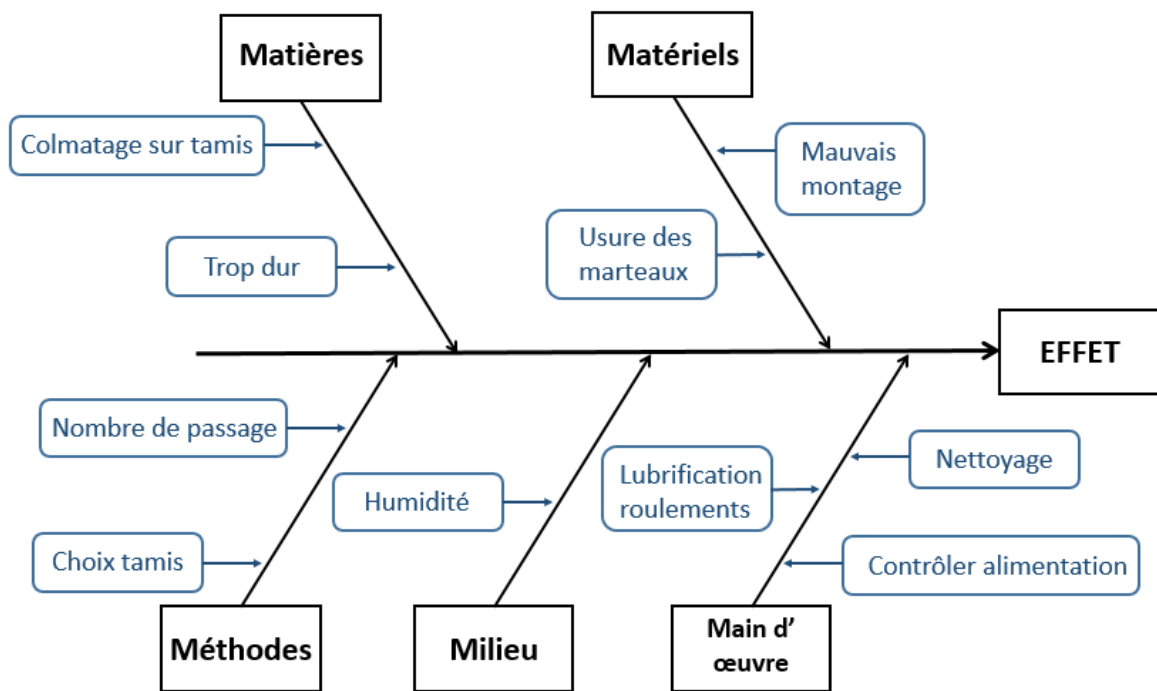


Figure 42: Diagramme Ishikawa du système de broyage

Compte tenu de causes illustrées ci-dessus on peut en déduire les solutions respectives suivantes :

- S'assurer que le broyage se fait dans un endroit clos et à l'abri de l'humidité ;
- Respecter les valeurs requises en termes d'humidité relative et dureté du matériel à broyer ;
- Les méthodes de production sont libre au choix de l'utilisateur tant qu'il souhaite l'alimentation humaine ou l'alimentation animal ;
- En termes de maintenance : il faut s'assurer du bon alignement dans le montage de chaque composante, contrôle hebdomadaire des serrages, graissage des roulements et le nettoyage de la machine.

3.7 Analyse FFOM

Tableau 21: Analyse FFOM

FORCES	FAIBLESSES
<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de production élevée • Taux élevé de broyage • Faible consommation d'énergie • La taille des particules uniforme • Structure simple, facile à opérer • Le rapport de réduction élevé • Rendement élevé • Il est facile à entretenir et à nettoyer. • Faible coût d'investissement • Il est rentable tout en fonctionnant à très grande vitesse. • La gestion facile 	<ul style="list-style-type: none"> • Non recommandé pour le meulage fin de matériaux très durs et abrasifs en raison d'une usure excessive. • Ne convient pas aux matériaux collants ou de type plastique à faible point de fusion en raison de la génération de chaleur dans la tête du broyeur à la suite d'un encrassement du broyeur. • Productivité dépendant des tamis employés
OPPORTUNITES	MENACES
<ul style="list-style-type: none"> • Disponible en différentes capacités et tailles. • Efficace dans les meilleurs délais : permet de gagner du temps et du travail humain. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le broyeur peut être étouffé si le débit d'alimentation n'est pas contrôlé, ce qui pourrait l'endommager. • Il y a une possibilité de colmatage de l'écran.

Conclusion

Cette étude dresse un bilan sur la comparaison de différents procédés de broyage. Il en ressort que le broyeur à marteaux est le plus adapté à Madagascar, avec le prix de fabrication du dispositif de broyage abordable ; le moteur est entraîné par un moteur asynchrone triphasé à 6,3 kW et permet de produire autour de ½ tonne par jour de produit bien dégradé et uniforme.

Le broyeur en question a été réalisé avec un arbre de 40 mm de diamètre tournant autour de 3000 tr/min et développant une puissance de 5 kW entraînant aussi l'hélice du ventilateur centrifuge.

D'autre part le travail effectué a permis la compréhension du phénomène d'aspiration des produits broyés par l'entremis d'un ventilateur centrifuge tournant à environ 3000 Tr/min et renvoyant le produit fini vers un séparateur cyclonique dont l'effet est d'optimiser la séparation granulométrique des produits sortant du broyeur.

Les investigations menées durant cette étude ont fait ressortir au moins différents paramètres d'optimisation de la fragmentation des solides en travaillant sur le diamètre de perforation des tamis, le nombre de tours de l'arbre de transmission de puissance muni ou non des accessoires de gain en productivité. De plus, une analyse a été développée compte tenu des forces et des limites du système de broyage à marteaux.

Le nombre d'entrées dans le broyeur ainsi que l'usage d'un trommel ont été identifiés comme paramètres de sélection de la norme qualité en finesse de la mouture des matériels à broyer.

Afin de compléter cette étude, on pourrait peut-être analyser en profondeur la mise en place d'un trommel à la sortie du séparateur cyclonique pour l'aspect commercial, durable et lucratif de l'activité.

Bibliographie

1. Fragmentation : **Aide Au choix d'équipements permettant la fragmentation de matières solides sur des bases énergétiques.** [En ligne]
<https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/cahier-technique-lafragmentation.pdf?ID=44160&saveFile=true>.
2. George Saravacos, Athanasios E. Kostaropoulos. **Handbook of Food Processing Equipment; Second Edition. Food Engineering Series.** Washington State University, USA. : Series Editor Gustavo V. Barbosa-Canovas.
3. Fehiniaina, RAHAROSON. **Conception et réalisation d'un broyeur à boulets en céramique.** s.l. : Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention de diplôme d'ingénieur des mines ESPA, 2009.
4. les neurones atomiques. [En ligne] <https://lesneuronesatomiques.com/le-labo/roches-et-test-de-durete/#:~:text=R%C3%A9ponse%201%20%3A%20Non.,la%20durete%C3%A9%20est%20d%C3%A9j%C3%A0%20connue>.
5. Alain Chamayou, Jacques Fages. **Broyage dans les industries agroalimentaires.** JeanPierre Melcion Jean-Luc Ilari. *Technologie des pulvérulents dans les IAA, Lavoisier, pp.375-406, 2003, Sciences Techniques Agroalimentaires, 978-2743006211.*
6. **Advantages and disadvantages of particle size reduction techniques.** [En ligne]
<https://www.cpm.net/downloads/Advantages%20and%20Disadvantages%20of%20Particle%20Size%20Reduction%20Techniques.pdf>.
7. **Analyse fonctionnelle.** [En ligne] http://lgm95.sciences.free.fr/SSI/cours/CHA_Crs1-Analyse%20Fonctionnelle.pdf.
8. FANCHON, Jean Louis. **Guide Des Sciences Et Technologies Industriels.** s.l. : NATHAN.
9. Manager Go, **FFOM.** [En ligne] <https://www.manager-go.com/strategie-entreprise/dossiersmethodes/diagnostic-strategique-swot>.
10. A., AJAKA E.O. and ADESINA. **DESIGN, FABRICATION AND TESTING OF A LABORATORY SIZE HAMMER MILL.** Akura, Nigeria : Department of Mining Engineering, School of Engineering and Engineering Technology ; The Federal University of Technology.
11. **Design and evaluation of crushing hammer mill.** M.M. IBRAHIM, M.S. OMRAN, E.N. ABD ELRHMAN.
https://www.researchgate.net/publication/331963135_Design_and_Evaluation_of_Crushing_Hammer_mill : s.n.
12. Gingery, David J. **How to Design and Build Centrifugal Fans for the Home Shop.** s.l. : Lindsay Pubns, 1987.

13. Mamitiana, RAMAMONJISOA. *BROYAGE: Comparaison coûts, puissances et productivités.*
14. Chevalier, **Guide du dessinateur industriel.** Edition 2004
15. [En ligne] **CONCEPTION ET REALISATION D'UNE BROYEUSE A MAÏS**
https://www.academia.edu/36345265/PROJET_DETUDE
16. Youde Xiong, **Formulaire De Mécanique Pièces De Constructions.** 2007

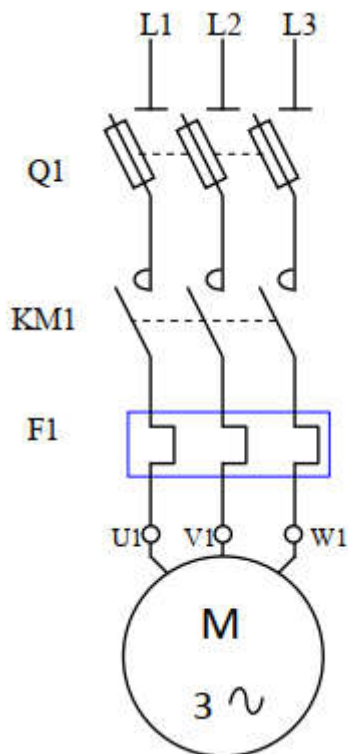
Annexe



Figure 43: Photo de la machine fabriquée

Démarrage direct à un seul sens de marche du moteur triphasé

Circuit de puissance



L1, L2, L3 : alimentation triphasée

Q1 : sectionneur fusible

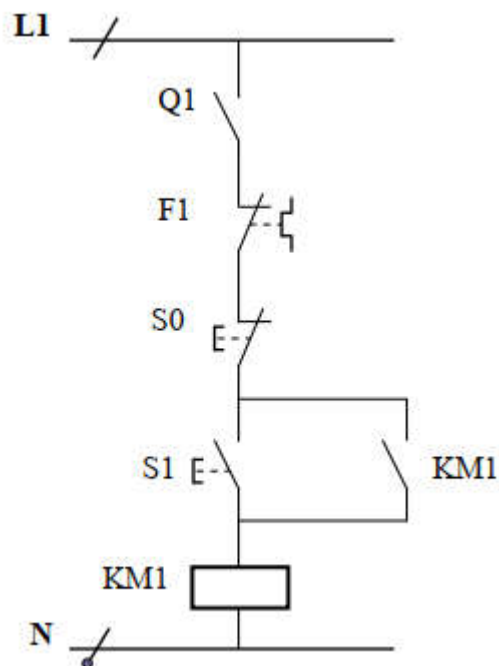
KM1 : contacteur principal 1

F1 : relais thermique

M : moteur triphasé

- Fermeture manuelle de Q1
- Fermeture de KM1, mise sous tension du moteur.

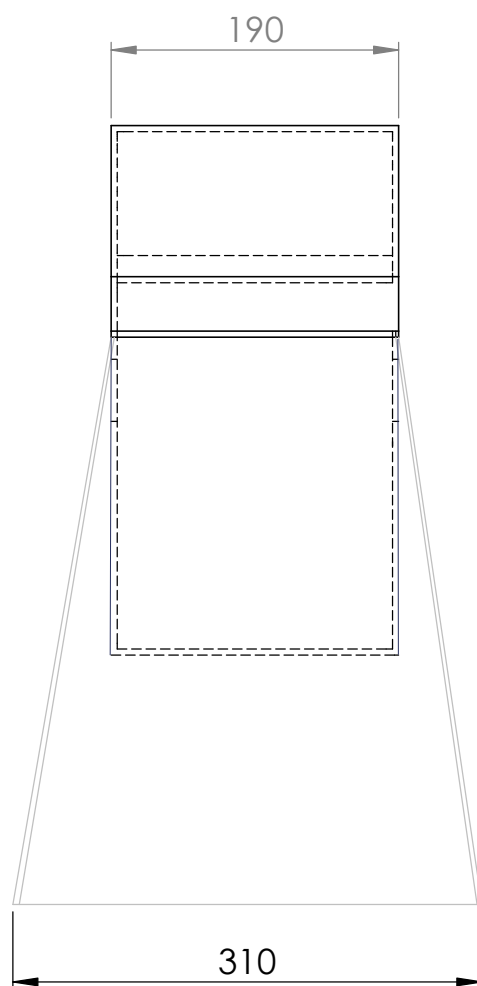
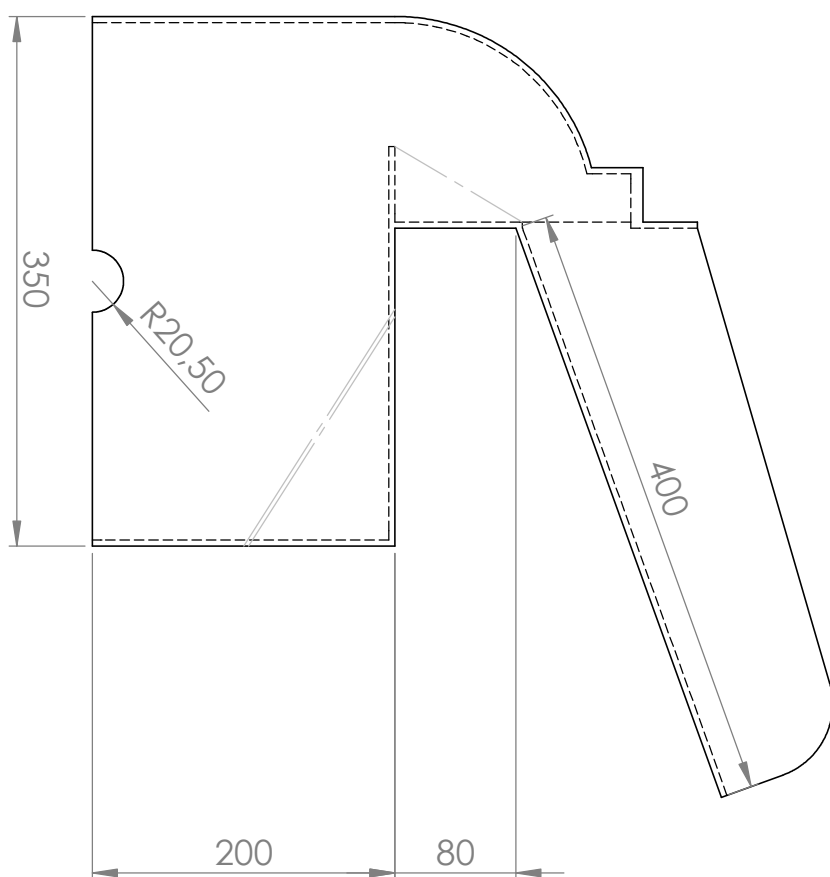
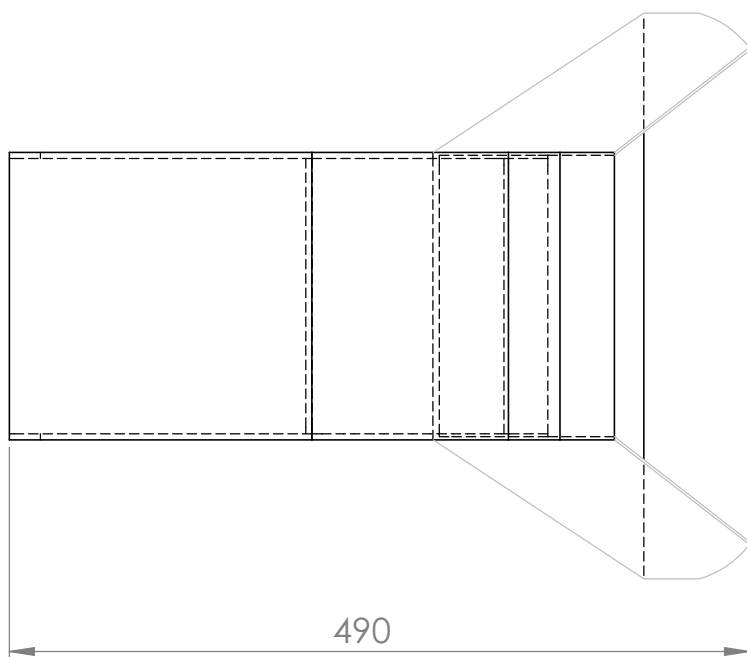
Circuit de commande



- Impulsion sur S1,
- Fermeture de KM1
- Auto-maintien du contacteur
- Arrêt par impulsion sur S0 ou par déclenchement du relais de protection F1

Tableau : Facteur de choc et de fatigue appliqué

APPLICATION	K_b	K_t
Charge appliquée graduellement	1,5	1,0
Charge appliquée soudainement (choc mineur)	1,5 à 2,0	1,0 à 1,5
Charge appliqué soudainement (choc intense)	2,0 à 3,0	1,5 à 3,0



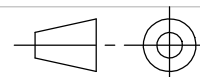
Partie supérieure machine

Echelle: 1:10

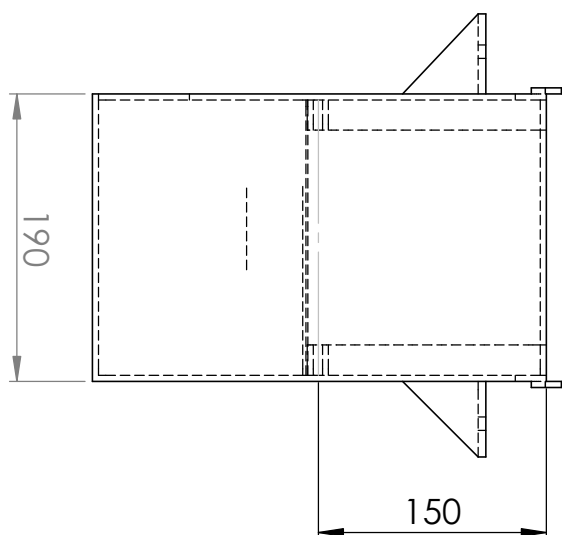
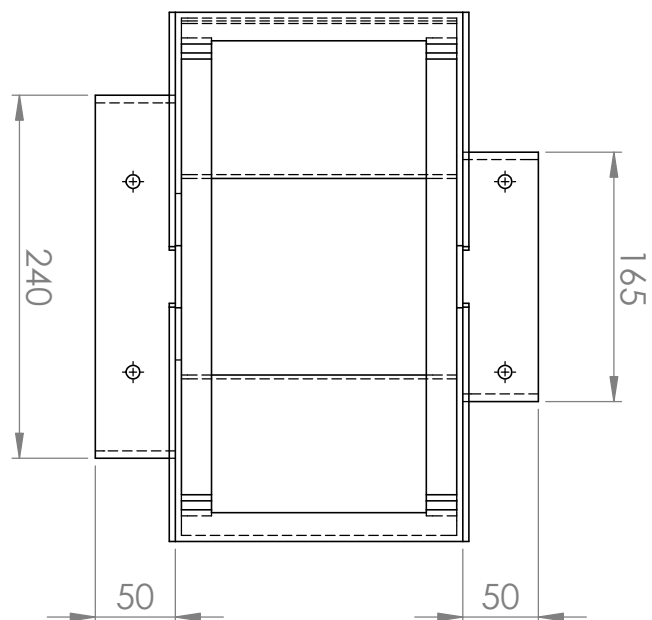
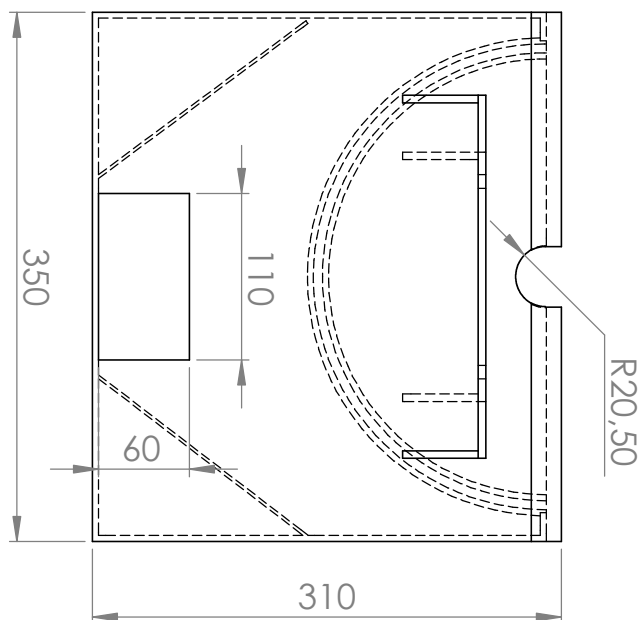
Jensen

22/11/2020

ESPA



PL1



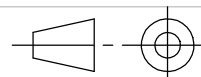
Partie inférieure machine

Echelle: 1:10

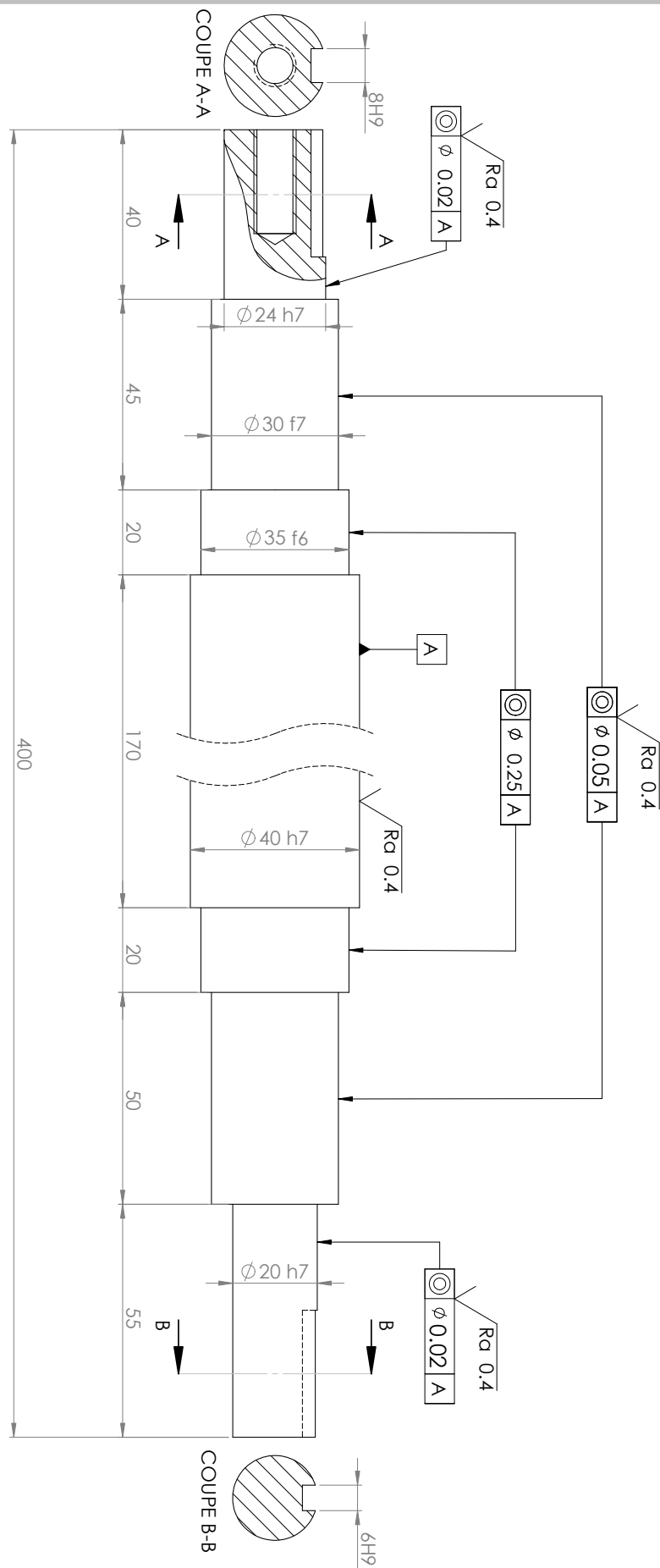
Jensen

22/11/2020

ESPA



PL2



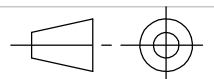
Arbre rotor

Echelle: 1:5

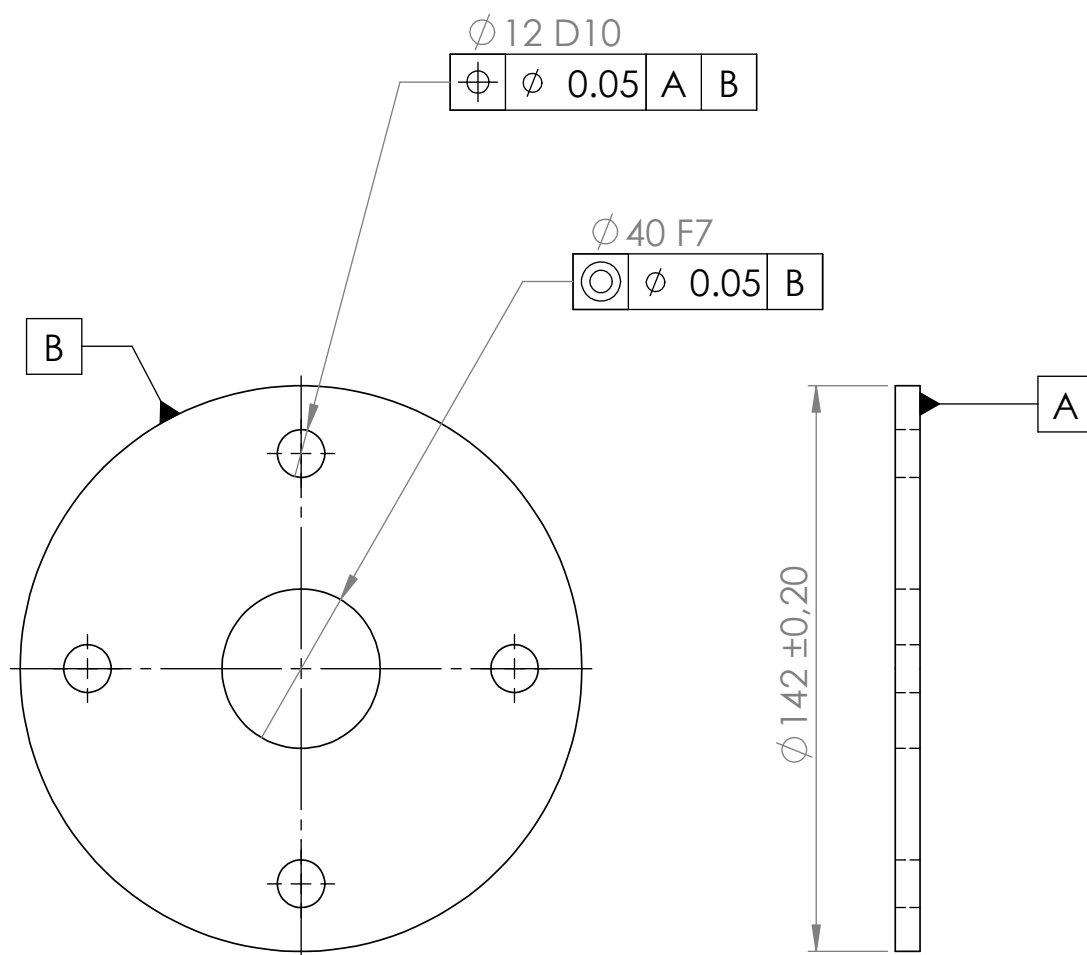
JENSEN

22/11/2020

ESPA



PL3



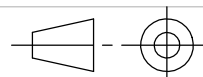
Disque rotor

Echelle: 1:2

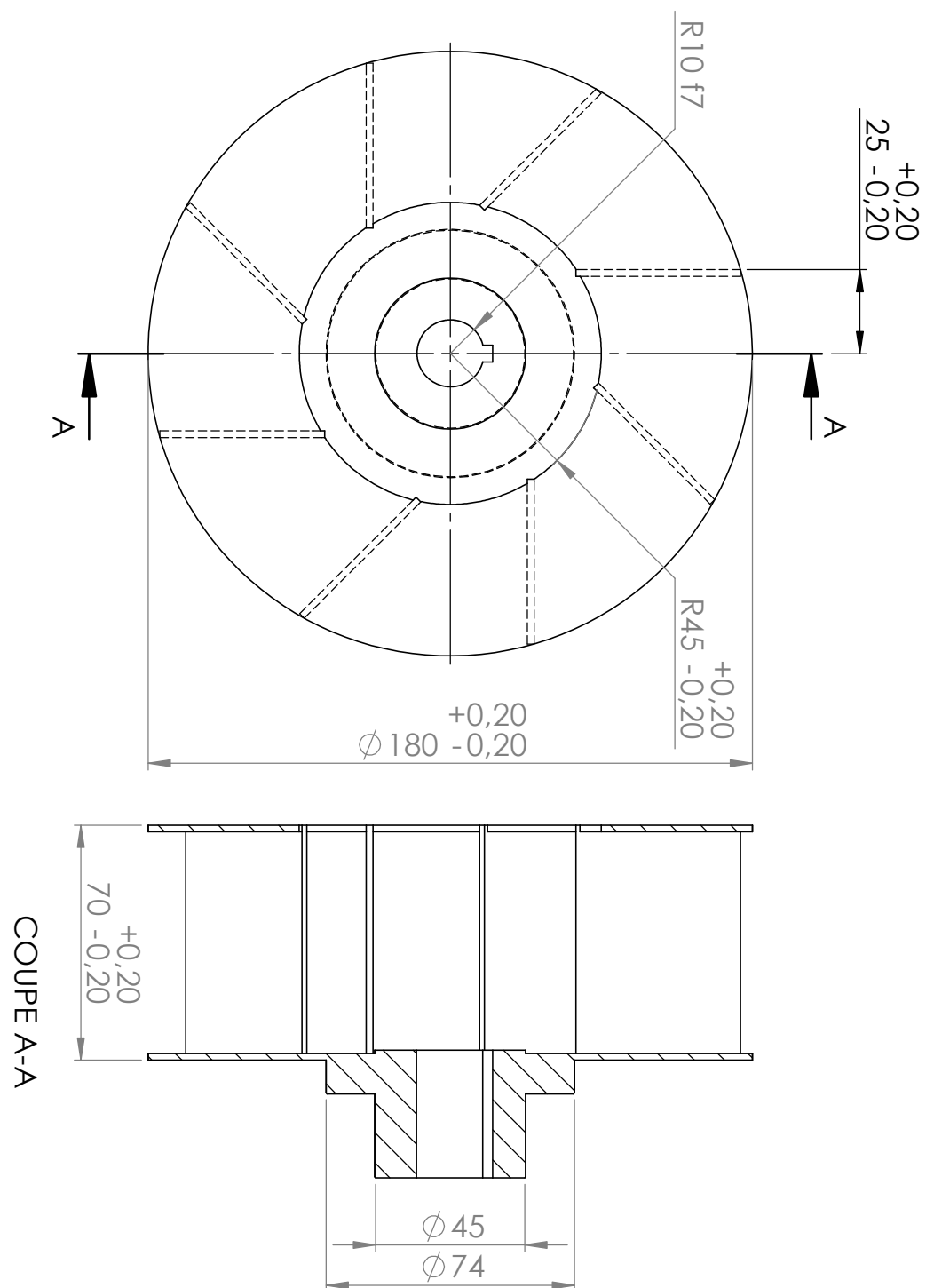
Jensen

22/11/2020

ESPA



PL4



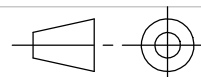
Hélice

Echelle: 1:2

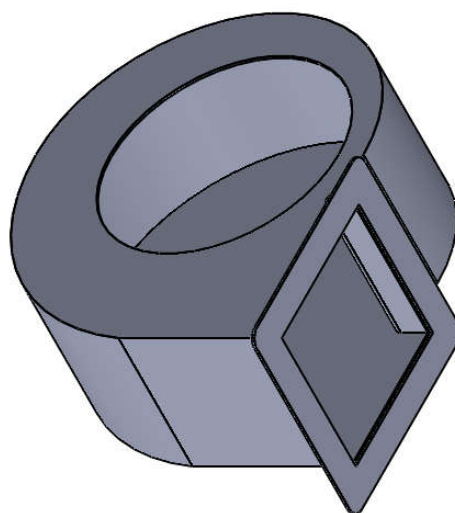
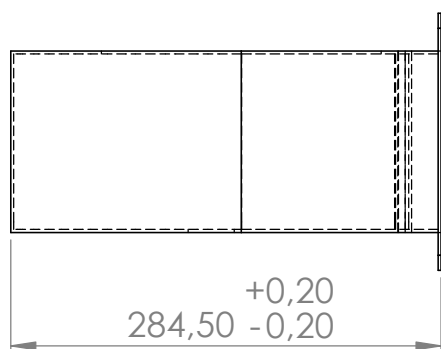
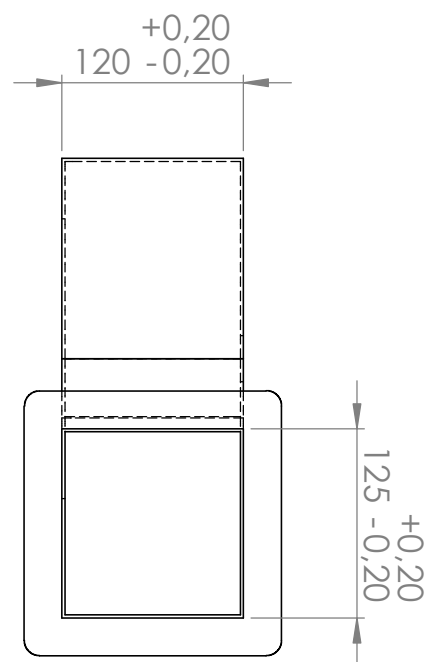
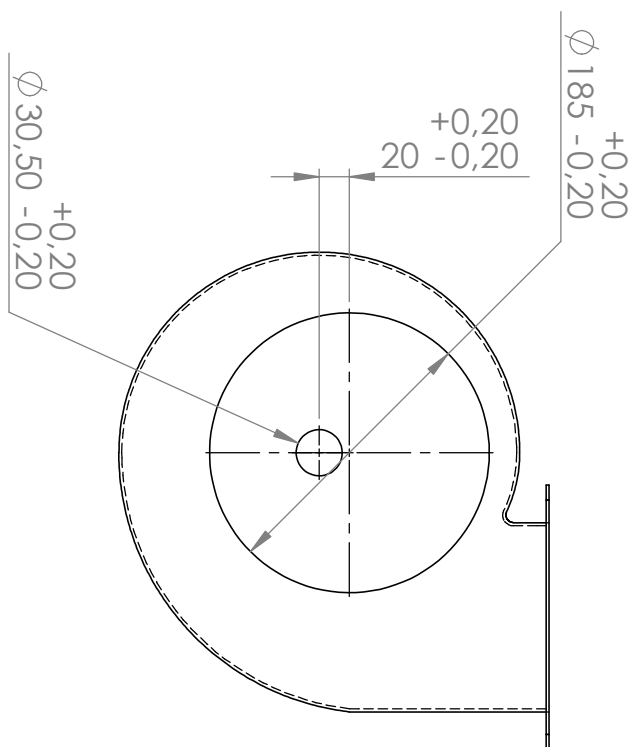
Jensen

22/11/2020

ESPA



PL5



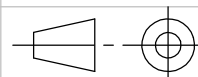
Volute - ventilateur centrifuge

Echelle: 1:5

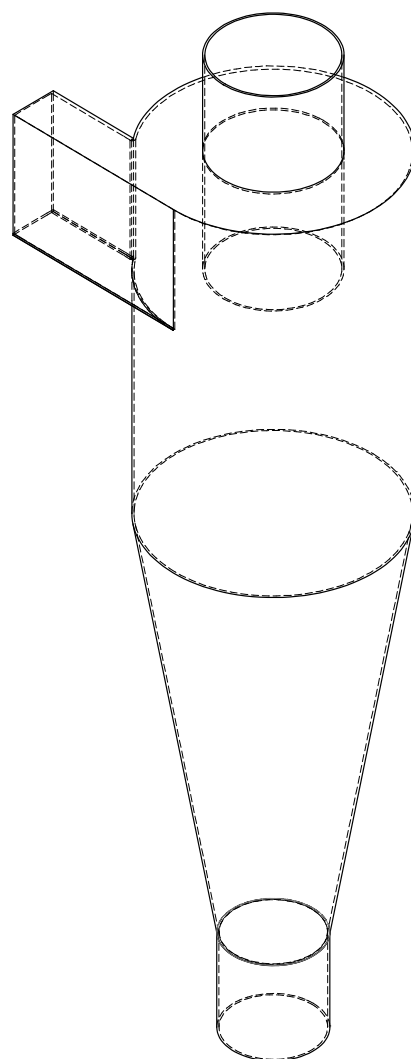
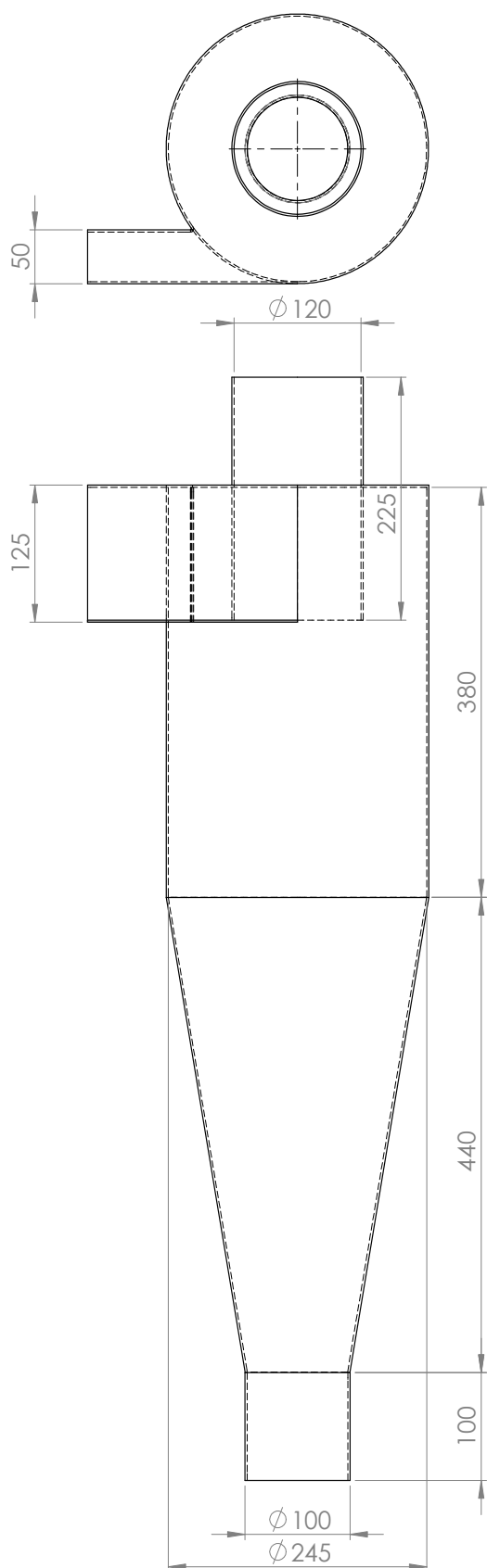
JENSEN

22/11/2020

ESPA



PL6



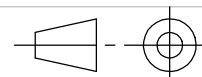
Séparateur cyclonique

Echelle: 1:10

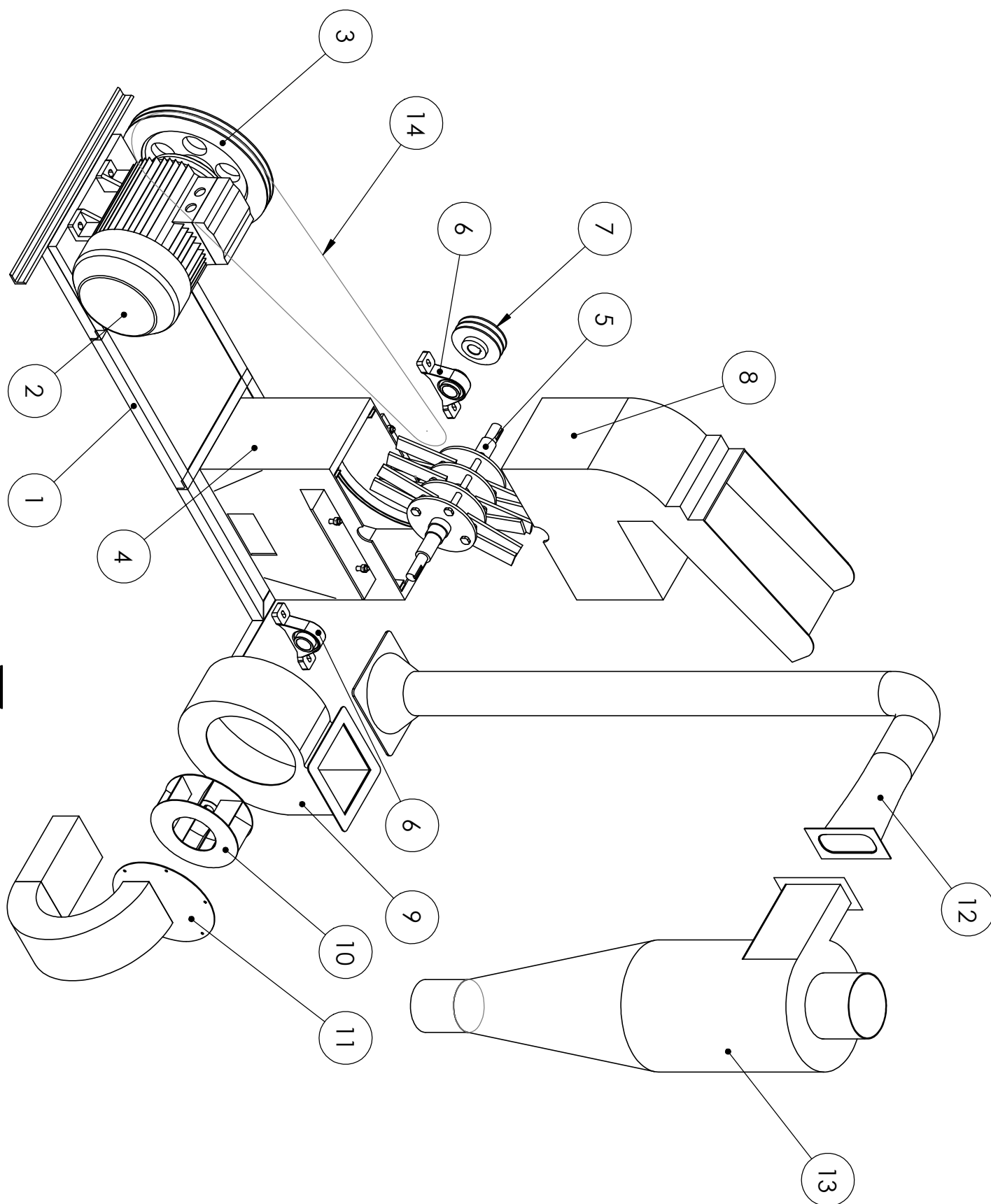
JENSEN

22/11/2020

ESPA



PL7

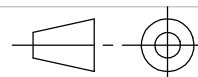


Dessin d'ensemble

Jensen

22/11/2020

ESPA



PL8

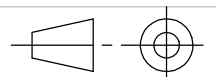
N°	Nb	Désignation	Matière	Réf.
1	1	Bâti	Acier (cornière)	50×50
2	1	Moteur électrique		
3	1	Poulie menante	Fonte	
4	1	Chambre de broyage inférieure	Acier TPN	
5	1	Arbre rotor	C22	
6	2	Paliers à semelles		
7	1	Poulie menée	Fonte	
8	1	Chambre de broyage supérieure	Acier TPN	
9	1	Caisson	Acier TPN	
10	1	Hélice	Acier TPN	
11	1	Chemin d'aspiration	Acier TPN	
12	1	Chemin de refoulement	Acier	
13	1	Cyclone	Acier TPN	
14	2	Courroie	Caoutchouc	B-1850 Li

Nomenclature

Jensen

22/11/2020

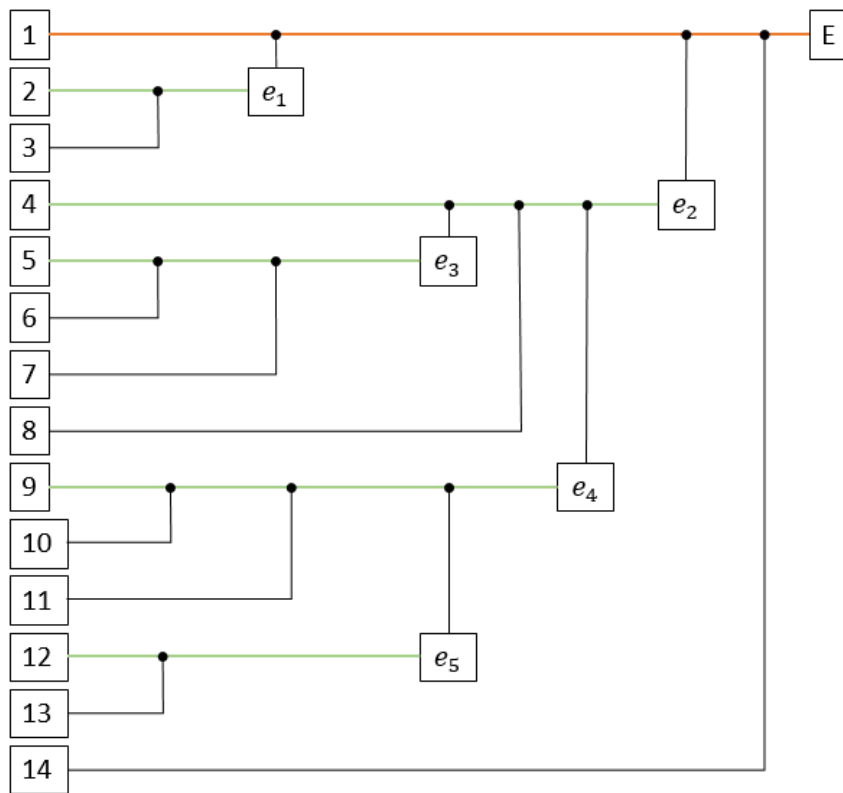
ESPA



PL9



Schéma d'assemblage



- E Ensemble E
- n Composant n
- e_n Sous-ensemble e_n

Nom et prénoms : RAKOTOMALALA Nantenaina Jensen

Email : rakotomalalajens@gmail.com

Téléphone : 0 34 41 540 60 ; 0 32 52 431 15



TITRE : CONCEPTION ET REALISATION D'UN BROYEUR A MARTEAUX

Nombres des pages : 70

Nombres des figures : 43

Nombres des tableaux : 21

RESUME

Dans ce travail, on peut dire que la machine conçue peut être fabriquée localement avec des matériels disponibles sur le marché local. Le système de broyage est adéquat à la fois pour usage expérimentale et aussi dans le but commercial pour une échelle semi-industrielle ; depuis la considération de la conception et d'analyse, de rentabilité, de sécurité, et des services rendu. La machine semble capable de broyer une large variété de matériel dans le but de l'alimentation humaine et animale, avec une capacité de broyage significative variant de 25 à 55 kg/h et une efficacité estimée à 88% pour les quatre matériels qu'on a expérimentés. Les produits de broyage sont rencontrés être bien fragmenté et uniforme.

Mots clés : Broyage, conception, productivité, produits alimentaires.

ABSTRACT

In this work, it can be said that the designed machine can be manufactured locally with materials available in the local market. The grinding system is suitable both for experimental use and also for commercial purpose on a semi-industrial scale; from consideration of design and analysis, profitability, safety, and output services. The machine seems capable of crushing a wide variety of material for human and animal consumption, with a significant grinding capacity varying from 25 to 55 kg / h and an efficiency estimated at 88% for the four materials that we experienced. The grinding products are found to be well fragmented and uniform.

Keywords: Grinding, design, productivity, food products.