

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة صالح بوبنيدر
قسنطينة 3
**Université
Salah Boubnider
Constantine 3**

UNIVERSITE SALAH BOUBNIDER CONSTANTINE 3
FACULTE GENIE DES PROCÉDÉS
DEPARTEMENT GENIE PHARMACEUTIQUE

N° d'ordre :

Série :

Mémoire

PRESENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
EN GÉNIE DES PROCÉDÉS
OPTION : GÉNIE PHARMACEURIQUES

ETUDE DU BROYAGE ET DU TAMISAGE

Présenté par :

**LAIB CHOUROUK
LADAYCIA RANDA
KHENE IBTISSEM**

Dirigé par :

**Dr SAMAI MESSAOUDA
MCB**

Année universitaire
2022/2023
Session : **JUIN**

Remerciement

Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous tenons à remercier Madame Samia Messaouda Docteur et Maitre de conférences classe B à l'université salah boubnider Constantine 3, Génie des procédés pharmaceutiques. Nous la remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, ses conseils, sa patience et sa disponibilité dans la préparation de ce projet de fin d'étude.

Nos sincères remerciements s'adressent aux membres du jury, pour accepter d'évaluer notre travail.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos parents et nos amis qui nous ont aidés d'un sourire, d'une critique, d'un encouragement ou d'un service pour tous les sacrifices consentis.

Merci

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

*À celle qui m'arrosé de tendresse et d'espairs, à la source d'amour : mes chers
parents « **Mohamed & Souad** », pour leur soutien, leur patience, leur
encouragement durant mon parcours scolaire.*

*À mon frère: **Housseem Rami**, et mes sœurs: **Houda & Aicha**, pour leurs soutien
et leurs amour.*

*À tous mes amies, et surtout mes chers amis : **Ibtissem, Chourouk, Maroua &
Oumaima.***

Randa

Dédicace

D'abord, je dédie ce travail à toute ma famille pour le soutien que j'ai reçu d'eux tout au long de mes années d'études

*Un merci spécial à mon bon père, **Abd el Malik**, qui a joué un rôle important dans ma vie, que ce soit financièrement ou spirituellement*

*Quant aux grands remerciements, ils vont à la personne la plus précieuse de ma vie, ma mère, **Fatima Al-Zahra**, qui malgré toutes les difficultés de la vie était l'étreinte chaleureuse qui me contenait*

*Je remercie également ma sœur **Khadidja** qui, malgré la différence d'âge entre nous, est ma meilleure amie, ainsi que mon frère **Kossai Dhiya Eddine**, mon soutien dans la vie*

*Je remercie également mes amies **Ibtissem, Randa, Omaima et Maroua**. Grâce à elles, ma vie universitaire a été merveilleuse*

Chourouk

Dedicace

Par quelles portes de louange entrerons-nous et par quels versets du poème passerons-nous

Je dédie ce modeste travail

*À l'âme de mon cœur **Salima***

À La plus gentille des mamans, à qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, Si tu n'étais pas à mes côtés, je n'aurais pas atteint où je suis maintenant, Je te souhaite tout le bonheur du monde. Que Dieu te protèges toujours

Merci ! Merci ! Merci

*À mon très cher père **Abd Elkarim***

Il est impossible d'écrire ce que mon cœur porte d'amour, d'appréciation et de respect pour toi, Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Peu importe le nombre de mots que je dis pour décrire les sentiments de joie dans mon cœur, je ne pourrai pas décrire ce que votre présence m'a ajouté, il a planté mon âme de joie et de joie Grâce à toi papa j'ai appris le sens de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours.

Que Dieu vous protège

*À mes chers sœurs : **Imene ; Maria ; Salsabil ; Anfel***

Si je devais vous remercier, mes remerciements ne vous combleraient pas. je t'écris du fond du Cœur, dont l'expression est la pureté de l'amour.

Vous êtes pour moi, comme une montagne qui ne tremble pas devant les vents, quelles que soient les conditions difficiles ou détériorées.

Que Dieu vous protège toujours et prenne soin de vous.

*À mes adorables amies : **Chourouk ; Randa ; Lilia ; Maroua ; Oumayma ; Wiem ; Fatima zohra***

Merci d'être là quand ça ne va pas. Merci de me prêter ton épaule quand j'en ai besoin.

Merci de me suivre et de m'encourager

Dieu vous bénisse et prend soin de vous

*À ma chère cousine **Serine***

Merci d'être toujours là pour m'encourager et pour votre soutien morale je t'aime .Et à tous ceux qui m'ont soutenu, je dis merci

Ibtissem

LISTE DES FIGURES

| | | |
|----------------------|---|----|
| FigureI.1: | Courbes de distributions en nombre, en surface ou en masse..... | 8 |
| FigureI.2: | Principe du compteur Coulter..... | 12 |
| FigureI.3: | Mesure granulométrique par diffraction de la lumière laser..... | 13 |
| FigureII.1: | Mécanismes de broyage..... | 19 |
| FigureII.2 : | Echelle de dureté de Mohs..... | 21 |
| FigureII.3 : | Broyeur à moule verticale..... | 24 |
| FigureII.4 : | Broyeur à moule horizontale..... | 24 |
| FigureII.5 : | Broyeur cylindre lisse..... | 25 |
| FigureII.6 : | Broyeur cylindre cannelé..... | 25 |
| FigureII.7 : | Broyeur à dents..... | 26 |
| FigureII.8 : | Broyeur à boulets..... | 26 |
| FigureII.9 : | Mouvements des broyeurs à boulets..... | 27 |
| FigureII.10 : | Broyeur à mâchoire..... | 27 |
| FigureII.11 : | Broyeur à marteau..... | 28 |
| FigureII.12 : | Broyeur planétaire à boulet..... | 28 |
| FigureII.13 : | Broyeur à mortier..... | 29 |
| FigureII.14 : | Broyeur à percussion..... | 30 |
| FigureII.15 : | Broyeur à couteaux..... | 31 |
| FigureII.16 : | Broyeur à rotor..... | 31 |
| FigureIII.1 : | Une tamiseuse..... | 36 |
| FigureIII.2 : | Différents types de tamis..... | 38 |
| FigureIII.3 : | Principe de fonctionnement du tamis Alpine à jet d'air..... | 42 |
| FigureIII.4 : | Tamiseuse AS 200 control..... | 44 |
| FigureIII.5 : | Tamiseuse L'AS 300 control..... | 45 |
| FigureIII.6 : | Tamiseuse L'AS 400 control..... | 46 |
| FigureIII.7 : | Tamiseuse L'AS 450 control..... | 46 |
| FigureIII.8 : | Tamiseuse L'AS 450..... | 47 |
| FigureIII.9 : | Tamiseuse 200 TAP..... | 48 |
| FigureIII.10: | Analyse 3PRO..... | 49 |

| | | |
|----------------------|---|----|
| FigureIII.11: | Tamiseuse analyste 3SPARTAN..... | 49 |
| FigureIV.1 : | Broyeur mixeur..... | 52 |
| FigureIV.2 : | Chambre de broyage..... | 52 |
| FigureIV.3 : | Pulvérisette 14 <i>FRITSCH</i> | 53 |
| FigureIV.4 : | Accessoires de la <i>pulvérisette 14 « chambre de broyage »</i> | 53 |
| FigureIV.5 : | Tamiseuse <i>Resch</i> | 54 |
| FigureIV.6 : | Tamiseuses AS200 control..... | 55 |
| FigureIV.7 : | Effet de la quantité à broyer sur le temps de broyage..... | 57 |
| FigureIV.8 : | Effet du concassage sur le temps de broyage..... | 58 |
| FigureIV.9 : | Effet du concassage sur le temps dans les deux broyeurs..... | 59 |
| FigureIV.10 : | Comparaison entre deux types de broyeurs..... | 60 |
| FigureIV.11 : | Effet du temps à différente fréquence du tamisage (<i>Resch</i>)..... | 64 |
| FigureIV.12 : | Effet du temps à différente fréquence du tamisage (AS200 control)... | 67 |
| FigureIV.13 : | Effet de vibration à différente temps du tamisage (<i>Resch</i>)..... | 70 |
| FigureIV.14 : | Effet de vibration à différente temps du tamisage (AS200 control)... | 73 |
| FigureIV.15 : | Effet de pelliculage dans le tamisage (<i>Resch</i>)..... | 75 |
| FigureIV.16 : | Effet de pelliculage dans tamisage (AS200 control)..... | 76 |
| FigureIV.17 : | Effet du tamisage manuel (<i>Resch</i>)..... | 77 |
| FigureIV.18 : | Effet du tamisage manuel (AS200control)..... | 77 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-----------------------|--|----|
| Tableau I.1 : | Différentes définitions de diamètres équivalents des particules..... | 5 |
| Tableau II.1: | Classification les différents types des broyeurs..... | 19 |
| Tableau III.1: | Tamis de contrôle | 39 |
| Tableau III.2: | Classification des poudres | 40 |
| Tableau III.3: | Caractéristiques d'AS 200 control | 44 |
| Tableau III.4: | Caractéristiques d'AS 300 control | 44 |

SOMMAIRE

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

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE SYSTEME PULVURELENT

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction..... | 3 |
| I.2 Systèmes pulvérulents..... | 3 |
| I.2.1 Définition..... | 3 |
| I.2.2 Les caractéristiques physiques d'une poudre..... | 3 |
| I.3 La granulométrie..... | 4 |
| I.3.1 Définition..... | 4 |
| I.3.2 Mesure granulométrique..... | 4 |
| I.3.2.1 Taille des particules..... | 5 |
| I.3.2.2 Distribution granulométrique..... | 6 |
| I.4 Méthodes d'analyse granulométrique..... | 8 |
| I.4.1 Analyse par imagerie..... | 9 |
| I.4.2 Tamisage..... | 10 |
| I.4.3 La sédimentation..... | 10 |
| I.4.4 Compteur électronique de particule type Coulter..... | 11 |
| I.4.5 Diffraction de la lumière..... | 12 |
| I.5 Domaine d'application..... | 13 |
| I.6 Les médicaments..... | 14 |
| I.6.1 Définition..... | 14 |
| I.6.2 Les voies d'administration des médicaments..... | 14 |
| I.6.3 Les comprimés | 15 |
| I.6.3.1 Comprimé enrobé..... | 15 |
| I.6.3.2 Comprimé non enrobé..... | 15 |

CHAPITRE II : BROYAGE

| | |
|---|----|
| II.1 Introduction..... | 16 |
| II.2 Le broyage..... | 16 |
| II.2.1 Définition..... | 16 |
| II.2.2 Objectifs..... | 17 |
| II.2.3 Opérations préliminaires..... | 17 |
| II.2.4 Mécanisme de broyage..... | 18 |
| II.2.5 Classification des broyeurs..... | 19 |
| II.2.6 Caractéristiques des matériaux à broyer..... | 20 |
| II.2.7 Différents types de broyages..... | 22 |
| II.3 Appareils de broyage..... | 23 |
| II.3.1 Appareils de laboratoire..... | 23 |
| II.3.2 Appareils industriels..... | 23 |
| II.4 Facteurs intervenant dans le choix d'un broyeur..... | 32 |
| II.4.1 Les propriétés de la substance à broyer..... | 32 |

| | | |
|--------|---|----|
| II.4.2 | La taille des particules à broyer et celles des particules à obtenir..... | 32 |
| II.4.3 | La forme des particules à obtenir..... | 32 |
| II.4.4 | Le rendement..... | 32 |
| II.4.5 | La capacité d'admission..... | 32 |
| II.4.6 | La performance, usage et prix..... | 32 |

CHPITRE III : TAMISAGE

| | | |
|----------|---|----|
| III.1 | Introduction..... | 34 |
| III.2 | Le tamisage..... | 34 |
| III .2.1 | Définition e tbut..... | 35 |
| III .2.2 | Principe..... | 36 |
| III .3 | Tamis..... | 37 |
| III .3.1 | Tamis normalisés..... | 38 |
| III .3.2 | Ouverture de maille et pourcentage de vide..... | 38 |
| III .3.3 | Classification des tamis..... | 39 |
| III .4 | Méthodes de tamisage..... | 41 |
| III .4.1 | Tamisage à la main..... | 41 |
| III .4.2 | Tamisage à la machine..... | 41 |
| III.4.3 | Tamisage par voie humide..... | 42 |
| III .4.4 | Tamisage avec jet d'air..... | 42 |
| III .4.5 | Tamisage par ultrasons..... | 43 |
| III .5 | Appareillage de tamisage..... | 43 |
| III .5.1 | Tamiseuse de contrôle L'AS..... | 43 |
| III .5.2 | Tamiseuse a vibrations..... | 48 |
| III .5.3 | Tamiseuse à haute performance..... | 49 |

CHAPITRE IV : PROCEDURE EXPERIMENTALE : RESULTATS ET DISCUSSION

| | | |
|----------|---|----|
| IV.1 | Introduction..... | 51 |
| IV.2 | Matériels et produits utilisées..... | 51 |
| IV.2.1 | Matériels..... | 51 |
| IV.2.2 | Produits utilisés..... | 55 |
| IV.3 | Résultats et discussion..... | 55 |
| IV.3.1 | Etude du broyage..... | 55 |
| IV.3.1.1 | Effet de la quantité à broyer..... | 56 |
| IV.3.1.2 | Effet du concassage..... | 57 |
| IV.3.1.3 | Effet du choix du broyeur..... | 59 |
| IV.3.2 | Etude de tamisage..... | 60 |
| IV.3.2.1 | Effet du temps de tamisage | 61 |
| IV.3.2.2 | Effet de vibration de tamisage | 67 |
| IV.3.2.3 | Effet de la nature de médicament sur le tamisage..... | 73 |
| IV.3.2.4 | Effet du tamisage manuel..... | 76 |

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

Re : Nombre de Reynolds.

D_{50} : diamètre médiane [μm].

d_v : diamètre volumique de la particule en [m].

d_d : diamètre de traînée de la particule en [m].

g : accélération de la pesanteur en [m^2/s].

μ_f : viscosité du fluide [$Pa.s$].

ρ_f : masse volumique du fluide [kg/m^3].

ρ_p : masse volumique des particules [kg/m^3].

v : vitesse limite de la particule [m/s].

$S_{calculée}$: surface calculé.

M_V : masse volumique vraie des particules [kg/m^3].

d : diamètre équivalent des tranches granulométriques 1 à n [m].

m : masses correspondant aux classes 1 à n .

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'industrie pharmaceutique est un domaine important qui rassemble les activités de recherche, de fabrication et de commercialisation des médicaments. Elle transforme la matière première qui est de l'origine naturelle ou chimique au produit final utilisable, dont le but thérapeutique pour l'humain ou vétérinaire et cosmétique.

Le concept de pulvérulent permet une nouvelle approche des technologies et des produits dans l'industrie des systèmes de poudre, il sera fréquemment utilisé dans le monde pharmaceutique pour la conception de médicaments.

L'équipement est en général utilisé, soit pour réaliser une manipulation ou une expérience, soit pour effectuer des mesures et rassembler des données. La majorité des préparations des poudres nécessite deux opérations : broyage et tamisage, le tamisage complète le broyage pour obtenir une poudre homogène. Si nous savons comment gérer les paramètres du broyeur et de tamiseuse nous pouvons normaliser la granulométrie de solide préparé.

Ces caractéristiques granulométriques des solides ou matières premières influencent directement le procédé d'élaboration et souvent les propriétés du produit final.

En termes de travail appliqué, nous avons réalisé une étude expérimentale sur le broyage et le tamisage à l'aide des appareils disponibles au laboratoire afin de connaître et d'analyser certains paramètres et d'autres facteurs. Les résultats de cette expérience nous ont servi dans l'étude granulométrique afin de calculer les paramètres caractéristiques des particules et de la poudre en générale.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré pour des généralités sur les systèmes pulvérulents, la caractéristique physique d'une particule et d'une poudre, leur étude granulométrique et la différence entre comprimés enrobés, non enrobés.

Dans le deuxième chapitre on présente l'opération de broyage, ses opérations, ses mécanismes, ses caractéristiques, aussi les différents types du broyage.

Egalement on présente l'opération de tamisage, son principe et ses appareillages, dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre présent la procédure expérimentale réalisée et les paramètres influencent sur broyage et le tamisage suivi des résultats expérimentaux obtenus avec leurs discussions.

Finalement le mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I

CHAPITRE I

Systèmes pulvérulents

I.1 Introduction

L'élaboration de particules de taille et/ou de forme contrôlée est généralement une inquiétude industrielle importante ; les facteurs taille/forme définissent la réactivité et les conditions d'utilisation d'une poudre.

Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur les systèmes pulvérulents, les caractéristiques physiques d'une particule et d'une poudre, son oublier les fondements théoriques de leur étude granulométrique.

I.2 Systèmes pulvérulents

I.2.1 Définition

Un matériau pulvérulent est un produit solide constitué de fines particules, peu ou pas liées entre elles, seront également considérés comme pulvérulents certains matériaux constitués de grains ou de fragments plus ou moins grossiers, susceptible de se réduire partiellement en poudre au cours de leur mise en œuvre, par frottement ou par choc (*granulé, sable, céréales, boulets de charbon,..*). [1]

Un groupe de particules, généralement de taille inférieure à 1(mm), mais des mélanges inhomogènes qui expliquent de manière similaire le comportement différent des poudres

- Énorme : Peut supporter certaines transformations
- L'écoulement d'un fluide
- gaz : compressible jusqu'à un certain point. [2]

I.2.2 Caractéristiques physiques d'une poudre

Le comportement d'un produit pulvérulent est déterminé par les caractéristiques physiques des particules qui le constituent, parmi lesquelles on peut citer :

La densité, la résistance mécanique, la forme, les dimensions, la distribution granulométrique, la porosité, et la surface spécifique. [3]

Dans un contexte industriel, on s'intéresse généralement aux comportements suivants :

- ✓ La durée de conservation des produits en suspension (*tel que les peintures*) varie d'un lot à l'autre ;
- ✓ Les poudres ne se compriment pas toujours de la même façon ;
- ✓ Pendant l'emballage d'une poudre, la densité obtenue n'est pas toujours la même de plus le tassement ultérieur n'est pas reproductible. [3]

I.3 Granulométrie

1.3.1 Définition

Analyse séparée de la taille des particules, de la distribution granulométrique et de la forme. [2]

La granulométrie est une caractéristique fondamentale d'un produit pulvérulent, elle est en relation directe avec toutes les opérations unitaires comme le broyage, tamisage, mélange et transfert, mais aussi avec les phénomènes d'échange et de réactivité physique (*migration d'eau, séchage, solubilisation*), chimiques (*oxydation*) ou enzymatique (*digestion de aliments*). [4]

L'étude granulométrique est une étape très importante dans la caractérisation d'une poudre, elle permet :

- l'obtention d'un mélange homogène « les particules doivent être de mêmes dimensions » : La taille des particules influe sur les propriétés mécaniques écoulement, compressibilité (le permanganate de potassium n'est directement comprimable que pour une certaine dimension des cristaux) pour la mise en forme des formes orales solides ;
- La stabilité des suspensions et la stabilité chimique. [5]

La granulométrie en pharmacie intervient dans :

- la vitesse de dissolution, l'homogénéité ;
- la qualité des poudres ;
- la stabilité des comprimés (*régularité de dosage, dureté, friabilité...*)
- Le pouvoir adsorbant des poudres. [5]

1.3.2 Mesure granulométrique

1.3.2.1 Taille des particules

Une particule solide est un individu difficile à caractériser sa surface, ses contours, ses dimensions sont souvent très irrégulières.

La mesure d'un diamètre, distance séparant un coté de la particule au côté opposé, n'a plus de sens physique dès que l'on s'éloigne d'une forme géométrique bien définie, cercle ou sphère.

Pour contourner cette difficulté, le résultat de la mesure est exprimé par le diamètre de la sphère théorique se comportant de la même manière que la particule considérée, une telle sphère est appelé sphère équivalente ;

Les dimensions équivalentes sont en réalité des dimensions fictives, relatives à la technique utilisée, à titre d'exemple le diamètre équivalent de tamisage sera le diamètre de la sphère qui passe juste à travers la même dimension de maille que la particule réelle considérée, pour la sédimentation il sera le diamètre de la sphère qui possède la même vitesse de sédimentation que la particule. [6]

Tableau I.1 : Différentes définitions de diamètres équivalents des particules. [3]

| <i>Symbole</i> | <i>Désignation</i> | <i>Définition</i> | <i>Formule</i> |
|----------------|------------------------------------|--|--|
| d_v | Diamètre volumique équivalent | Diamètre d'une sphère ayant le même volume que la particule | $v = \frac{\pi}{6} d_v^3$ |
| d_s | Diamètre surfacique équivalent | Diamètre d'une sphère ayant la même surface que la particule | $s = \pi d_s^2$ |
| d_{sv} | Diamètre surface-volume équivalent | Diamètre d'une sphère ayant le même rapport surface/volume que la particule | $d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$ |
| d_d | Diamètre de traînée | Diamètre d'une sphère présentant la même résistance à l'avancement F_d que la particule dans un fluide de viscosité identique μ_f et à la même vitesse v . | $F_d = 3\pi d_d \mu_f v$ $Re < 0.2$ |
| d_f | Diamètre de chute libre | Diamètre d'une sphère ayant la même densité et la même vitesse de chute libre que la particule dans un fluide de | |

| | | | |
|----------|--------------------------|---|---|
| | | densité et de viscosité identique | |
| d_{st} | Diamètre de stokes | Diamètre de chute libre d'une particule dans un fluide en écoulement laminaire, de nombre de Reynolds ($Re < 0.2$) | $d_{st}^2 = \frac{d_v^3}{d_a}$ |
| d_a | Diamètre d'aire projetée | Diamètre d'un cercle ayant la même surface que l'aire projetée de la particule A, celle-ci étant en position stable | $A = \frac{\pi}{4} d_a^2$ |
| d_p | Diamètre d'aire projetée | Diamètre d'un cercle ayant la même surface que l'aire projetée de la particule, celle-ci ayant une orientation Aléatoire | Valeur moyenne pour toutes les orientations possible ; $d_p = d_s$ pour les particules convexes |
| d_{pr} | Diamètre péri métrique | Diamètre d'un cercle ayant le même périmètre que la projection du contour de la particule | |
| d_T | Diamètre de tamisage | Ouverture carrée minimale du tamis à travers laquelle la particule peut passer | |
| d_F | Diamètre de Féret | Largeur de la plus petite bande de plan, parallèle à une direction donnée, qui contient entièrement l'image de la particule | |
| d_M | Diamètre de Martin | Longueur moyenne de la corde de la projection du contour de la particule | |

1.3.2.2 Distribution granulométrique

Déterminer la taille d'une seule particule d'un lot s'avère non seulement difficile mais de plus inefficace et non souhaitable pour décrire l'hétérogénéité de ce lot.

Toutes les techniques de mesure opèrent donc sur un grand nombre de particules qui composent une population, le résultat est représenté sous forme d'histogrammes appelés distribution granulométrique ou la population est divisée en classes de dimensions (*en abscisse*) et leurs proportions relatives exprimées en fréquences (*en ordonnée*). [4]

➤ **Lois théoriques des distributions granulométriques**

L'ajustement des distributions observées à des modèles de référence est recherché pour une description de la forme globale de ces distributions.

➤ **Forme de représentation**

La représentation la plus intuitive et la plus efficace est l'histogramme (ou la courbe en fréquence) : le nombre ou la proportion de particules se trouvant dans chaque classe de taille est représentée séparément.

Un autre mode de représentation est la forme cumulée qui exprime quelle proportion de matériau se trouve au-dessus ou en dessous d'une certaine valeur de taille. Si le cumul des proportions s'effectue à partir de la classe de plus petite dimension (en dessous d'une valeur limite), la distribution est dite en passants cumulés. Si au contraire le cumul s'effectue à partir de la classe de plus grande dimension (au-dessus d'une valeur limite), la distribution est dite en refus cumulés. [4]

➤ **Grandeurs représentatives**

La fréquence de chaque classe granulométriques peut être déterminée par une distribution en nombre, surface, volume ou masse figure I.3.

L'histogramme décrit comment une propriété liée à la taille des particules est distribuée à travers la population. Si par exemple, par une technique appropriée, nous comptons les particules contenues dans des classes granulométriques définies, nous obtenons une distribution en nombre, le fait de peser les particules contenues dans ces mêmes classes granulométriques au lieu de les compter permet d'obtenir une distribution en masse.

Nombre ou masse sont ensuite exprimés en fréquences (*axe des ordonnées*). Le choix de l'un ou de l'autre dépend à la fois de la technique utilisable et du but pour suivi.

Un tamis ne permet que d'appréhender la distribution en masse, tandis qu'un compteur à variation de résistance permet de mesurer le nombre de particules d'une classe donnée. La conversion de l'une à l'autre n'est possible que moyennant certaines hypothèses sur la forme et la masse volumique des particules.

Si au lieu d'exprimer le nombre de particules par classe de taille, nous exprimons la fraction de surface - ce que permettent les techniques d'imagerie - ou la fraction de volume correspondante, nous obtenons une distribution en surface ou une distribution en volume. Cette

dernière est assimilée à la distribution en masse dans la mesure où les masses volumiques des différentes particules sont souvent proches les unes des autres pour un même produit. [4]

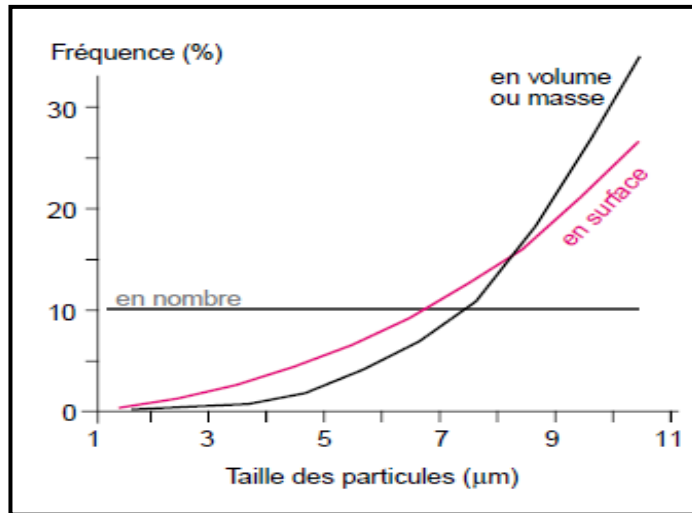


Figure I.1 : Courbes de distributions en nombre, en surface ou en masse.

➤ Paramètres de la distribution

Les distributions sont difficiles à les utiliser à l'état brut, pour faciliter les interprétations des résultats on est amené à introduire des paramètres qui décrivent la tendance centrale et la dispersion des distributions. [4]

La tendance centrale décrit la taille des particules majoritaire dans la population les notions de mode, de médiane et de moyenne classique en statistique sont également utilisés en granulométrie.

➤ Surface calculée

La distribution peut être obtenue par un calcul de la surface, chaque tranche granulométrique est supposée ne contenir que des sphères de même diamètre équivalent par l'application de la formule suivante :

$$S_{\text{calculée}} = (6 / M_V) (m_1/d_1 + m_2/d_2 + m_3/d_3 + \dots + m_n/d_n) \quad (\text{I.1}) [4]$$

I.4 Méthodes d'analyse granulométrique

Plusieurs méthodes sont disponibles pour mesurer les tailles des particules pulvérisées mais le choix de la méthode idéale qui permet la détermination de la caractéristique recherchée dépend de certains critères tel que :

- La nature de la substance à analyser (solubilité...) ;
- La gamme de dimensions accessibles aux appareils, poudre grossière on applique le tamisage, pour une poudre moyenne on a la possibilité d'utiliser le tamisage, compteur Coulter, diffraction laser ces deux dernier méthodes sont aussi utiliser pour l'analyse granulométrique d'une poudre fins plus la sédimentation [6] ;
- Le choix de paramètre dimensionnel (diamètre en nombre, en volume, de tamisage, ...).

I.4.1 Analyse par imagerie

L'imagerie permet de visualiser des objets en deux dimensions, et l'analyse des images permet d'apprécier non seulement la taille mais aussi la forme des particules. [7]

L'appareil comporte une caméra associé à un microscope pour les particules entre 0.5 et 200 μ m. ou à une objective photo classique pour des tailles des particules supérieures. [8]

Il s'agit d'une analyse individuelle : les particules sont généralement visualisées isolées les unes des autres. Le nombre minimal de particules pour une bonne représentation statistique est de 500.

A l'échelle microscopique les particules sont généralement dispersées dans un liquide et placées sur une lame. À l'échelle macroscopique, des dispositifs ont été proposés et sont maintenant commercialisés qui consistent à acquérir des images de particules passant en flux devant la caméra. [9] L'analyse peut aussi être globale : les particules sont observées en vrac sans être nécessairement séparées des unes des autres. [10]

Les caméras les plus courantes sont des caméras monochromes munies d'une carte d'acquisition qui réalise une digitalisation à la fois spatiale et en niveaux de gris. Le résultat de l'acquisition est un tableau de « points image » appelés pixels ayant chacun une valeur d'intensité de gris codée souvent entre 0 (*noir*) et 255 (*blanc*).

Le comptage du nombre de pixels de l'objet et de son contour permet d'estimer la surface (S) et le périmètre (P) des particules de l'image, ainsi que des paramètres de forme.

Les distributions granulométriques peuvent être exprimées en nombre ou en pourcentage de la surface totale. Le diamètre calculé à partir de la surface est un diamètre équivalent surface. Il est possible aussi d'établir des distributions de taille et de forme. [4]

I.4.2 Tamisage

Bien que cette méthode soit la plus ancienne, c'est aussi l'une des plus largement utilisées car il est peu coûteux ; Son principe c'est de diviser un matériau pulvérulent par son passage à travers un ou plusieurs tamis dont les caractéristiques sont connues. Cette méthode fait l'objet notre travail elle sera présentée en détail dans le chapitre 3.

I.4.3 Sédimentation

La vitesse de chute des particules dans un fluide sous l'influence de la gravité, utilisant l'équation de Stokes pour les faibles valeurs de nombre de Reynolds,

$$\left(\frac{d_v}{d_d}\right) = \frac{18 \mu_f v}{(\rho_p - \rho_f)g} \quad (I.2)$$

L'application de cette loi fait appel aux hypothèses suivantes :

- Particules sphérique, lisses et rigides ;
- Fluide doit être homogène et le milieu infini par rapport à la taille des particules ;
- Les particules se déplacent comme si elles étaient dans un milieu fluide infini ;
- La vitesse de sédimentation doit être faible.

La sédimentation par gravité peut être appliquée par deux méthodes, la première c'est une suspension homogène et la deuxième les particules sont mises en suspension puis celle-ci est introduite à la surface d'un liquide vide de particules.

Deux techniques de mesure sont disponibles incrémentales ou cumulative :

- Incrémentales c'est la détermination des changements de concentration ou de densité de la suspension en fonction du temps et la profondeur de la sédimentation, cette méthode est longue nécessite une manipulation importante, les masses sont déterminées par prélèvement, séchage et pesée, afin d'obtenir la concentration en solide.

- Cumulatives qui mesure le taux de sédimentation des particules sont rarement utilisées parce que il faut que la majeure partie des particules se soient déposées pour que l'on puisse faire une analyse granulométrique. [3]

I.4.4 Compteur électronique de particule type Coulter

Cet appareil est capable de déterminer la taille et la forme en suspension dans une solution d'électrolytes.

Exposé pour la première fois en 1956 comme méthode de comptage et de mesure des dimensions des globules sanguins, puis il a été rapidement adopté pour l'analyse granulométrique des différents matériaux. Le principe de fonctionnement est démontré dans la figure I.4.

L'échantillon est dispersé dans l'électrolyte contenu dans un récipient, Le passage de chaque particule entre les deux électrodes immergées entraîne une modification du courant électrique qui est fonction de la taille de la particule, Chaque impulsion est électriquement mesurée.

L'écoulement entre les deux électrodes s'effectue sous l'effet d'une pompe à vide, cela déséquilibre en même temps un siphon de mercure alors l'appareil peut fonctionner selon ces deux mode si dessous

Le système est isolé de la source de vide en fermant le robinet A, l'écoulement par action de rééquilibrage du siphon à mercure et le comptage correspond au passage d'un volume connu d'électrolyte à travers l'orifice (les deux électrodes) ;

Le comptage est démarré manuellement et s'arrête lorsque l'on atteint le nombre de particules affiché, qui peut aller jusqu'à 1 million. Cette technique est utilisée pour les particules de $0.4\mu\text{m}$ à $800\mu\text{m}$. [3]

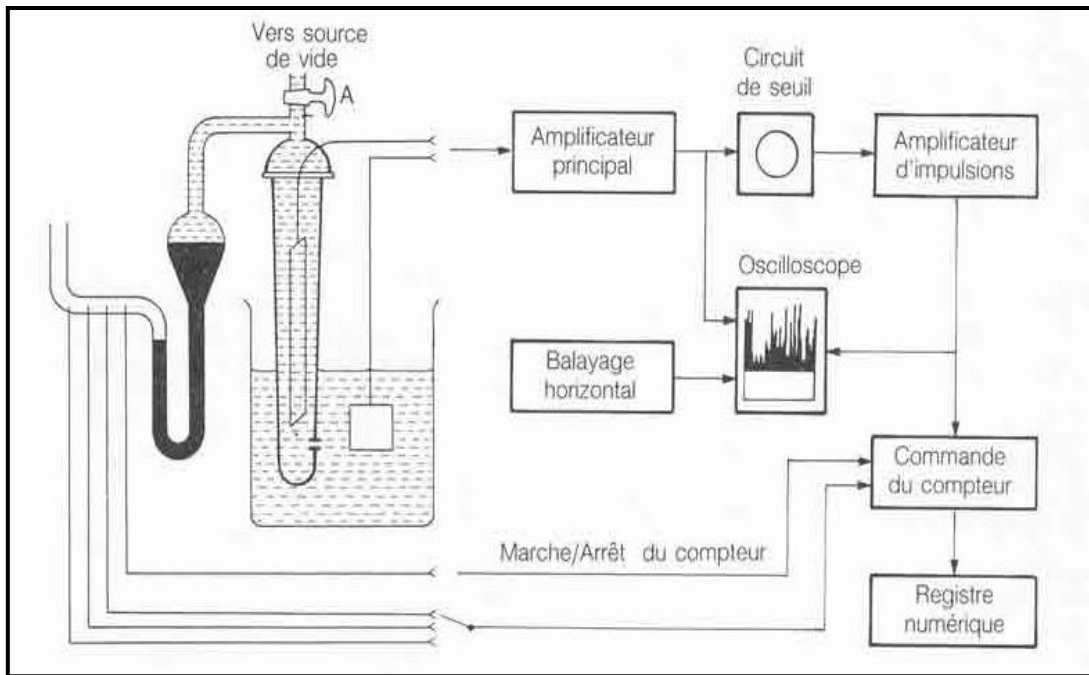


Figure I.2 : Principe du compteur Coulter.

I.4.5 Diffraction de la lumière

La distribution granulométrique est déduite de l'interaction entre un ensemble des particules et un rayonnement incident. Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une particule, la lumière peut être absorbée, diffusée ou transmise.

Un cas particulier du phénomène de diffusion est la diffraction de la lumière (*théorie de Fraunhofer*) qui s'applique si la taille des particules est nettement supérieure à la longueur d'onde utilisée (particules de taille supérieure à 0,5-1 micron). Le principe est appliqué pour des poudres de quelques micromètres à plusieurs millimètres. Il fait l'objet d'une norme *Afnor NF X11-666* de septembre 1984. [8]

Lorsqu'une particule sphérique est éclairée par un faisceau parallèle de lumière cohérente et monochromatique, il apparaît un motif de diffraction sous forme de franges (ou couronnes) Concentriques alternativement claires et sombres, observé à l'infini ou dans le plan focal image d'une lentille : selon la théorie de *Fraunhofer*, l'intensité du rayonnement diffracté, mesurée en un point donné sur un détecteur, est une fonction du rayon de la particule, L'angle de diffraction est d'autant plus grand que les particules sont plus petites figure I.5. La position des particules et leur mouvement n'ont pas d'effet sur la figure de Diffraction. [4]

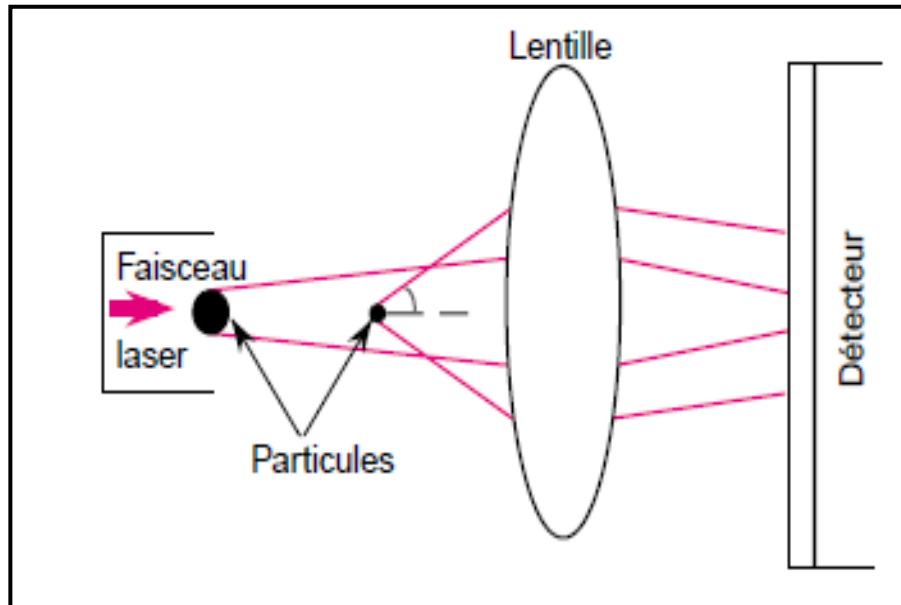


Figure I.3 : Mesure granulométrique par diffraction de la lumière laser.

I.5 Domaine d'application

Les industries les plus variées nécessitent la mise en œuvre de produits pulvérulents combustibles, en tant que matière première, produit intermédiaire, additif, produit fini, ou déchet, par exemple :

- * la chimie,
- * la pharmacie,
- * l'industrie agro-alimentaire,
- * la métallurgie,
- * la sidérurgie,
- * l'industrie du bois,
- * la production d'énergie à partir de charbon ou de coke de pétrole,
- * le traitement des déchets et des boues de stations d'épuration.

Dans chaque type d'industrie, l'élaboration des produits nécessite l'exploitation de différents procédés où des solides pulvérulents sont impliqués, soit qu'ils y soient introduits sous cette forme, soit que leur formation résulte de l'exploitation du procédé lui-même (en tant que produit, coproduit ou déchet), on cite quelques procédés :

- * Stockage,
- * Manutention,
- * Broyage,
- * Tamisage/Filtration,
- * Mélangeage,
- * Polissage,
- * Dépoussiérage,
- * Séchage,
- * Incinération,
- * Revêtement. [4]

I.6 Médicaments

I.6.1 Définition

De manière générale, un médicament est composé : d'un principe actif, qui est responsable de l'effet du médicament, d'excipients (par exemple le lactose), des composés inactifs qui apportent de la matière ou du volume. Il peut aussi contenir, entre autres des conservateurs pour éviter la dégradation et des colorants, qui vont donner de la couleur. Seul le principe actif a un effet thérapeutique. [11]

I.6.2 Voix d'administration des médicaments

Il existe plusieurs voix d'administration du médicament, on site :

- * Voie buccale (sublinguale, perlinguale) ;
- * Voie orale, per os ;
- * Voie rectale ;
- * Voie cutanée ;
- * Voie transdermique ;
- * Voie ophtalmique ;
- * Voie auriculaire ;
- * Voie nasale ;
- * Voie pulmonaire ;
- * Voie vaginale. [14]

I.6.3 Comprimés

Les comprimés sont des préparations solides contenant une unité de prise d'une ou plusieurs substances actives. Ils sont obtenus en agglomérant par compression un volume constant de particules ou par un autre procédé de fabrication approprié tel que l'extrusion, le moulage ou la cryodessiccation (lyophilisation). [12]

I.6.3.1 Comprimé enrobé

Selon la Pharmacopée européenne, comprimé recouvert d'une ou plusieurs couches de mélanges de substances diverses telles que résines naturelles ou synthétiques, gommes, gélatine, charges insolubles inactives, sucres, substances plastifiantes, polyols, cires, colorants autorisés par l'autorité compétente et parfois aromatisants et substances actives.

Les substances employées pour l'enrobage sont généralement appliquées sous forme de solution ou de suspension dans des conditions qui favorisent l'évaporation du solvant. Quand l'enrobage est constitué d'un film polymère très mince, le comprimé est dit pelliculé. [13]

I.6.3.2 Comprimé non enrobé

Forme galénique comprenant des comprimés à couche unique résultant d'une seule compression et des comprimés à couche multiple (comprimés multicouches) résultant de compressions successives exercées sur des ensembles différents de particules (Pharmacopée européenne). [13]

CHAPITRE II

CHAPITRE II

LE BROYAGE

II.1 Introduction

L'idée du broyage est assez ancienne car depuis le début de l'humanité, les hommes ont cassé des pierres, concassé des minerais, broyé leurs aliments et jusqu'à nos jours le broyage n'est pas seulement l'une des opérations importante fréquentée dans notre vie quotidienne, mais il constitue un procédé fondamental dans divers industries.

Dans ce chapitre on va présenter l'opération de broyage, sa définition, ses mécanismes, ses opérations et ses appareillages.

II.2 Broyage

II.2.1 Définition

Le broyage c'est une opération qui consiste à diviser un produit solide en particules de taille réduite par fragmentation mécanique, le terme de pulvérisation est aussi utilisé lorsque la fragmentation conduit à une poudre [5] [11].

Parmi toutes les opérations unitaires d'obtention de poudres, le broyage est sans doute celle qui est le plus utilisée. Le résultat de cette opération peut être :

- Particules grossières dont la taille est de l'ordre du *mm* ;
- Particules fines dont la taille est inférieure à 500 micromètres ;
- Particules ultrafines dont la taille est inférieure à quelques dizaines de micromètres. [12]

Les opérations de broyage peuvent avoir divers objectifs parmi lesquels on peut citer [13] :

- Réduction des dimensions soit pour faciliter la manipulation, le stockage, le transport, le conditionnement ou l'utilisation, soit pour libérer les constituants avant une opération de séparation ;
- Augmentation la réactivité vis-à-vis de processus dont la cinétique dépend de la finesse des particules ;
- Homogénéiser (*mélanges, dilutions solides, dosages*) ;

- Définition de certains paramètres (*de forme, de texture, de distribution granulométrique*).

Cette technique présente une large utilisation dans le domaine industriel, avec le développement technologique, le broyage est devenu omniprésent dans le monde des industries métallurgiques, chimique, pharmaceutique, agroalimentaire, etc.

Le broyage peut être classé en différents types :

- * Broyage à sec (moins de 2 % d'eau dans le produit) ;
- * Broyage semi-humide (2 à 25% d'eau dans le produit) ;
- * Broyage en phase liquide ou broyage a voie humide (25 à 300% d'eau dans le produit). [16]

Dans le côté pharmaceutique ; Le broyage est une opération pharmaceutique qui consiste à réduire la taille des particules sous l'effet d'une force mécanique. Le broyage peut être précédé de diverses opérations destinées à préparer la matière première et être suivi du contrôle de la poudre obtenue. [17]

II.2.2 Objectifs

Les objectifs et les butes du broyage est de conduire une taille de particule acceptable pour une utilisation spécifique dans plusieurs utilité et pour un traitement ultérieur à

Appliquer : [18]

- * La préparation de formes galéniques (poudres, comprimés, gélules...)
- * Avoir une granulométrie maîtrisée ;
- * Meilleure homogénéité et stabilité des mélanges de poudres ;
- * Améliorer la stabilité des suspensions ;
- * Accélérer le séchage ;
- * Extraction liquide des principes actifs (plante) est plus facile ;
- * Augmenter la vitesse de dissolution ce qui améliore la biodisponibilité. [19]

II.2.3 Opérations préliminaires

Avant toute opération de broyage la matière première peut subir des opérations préliminaires afin de faciliter son broyage ou sa pulvérisation, ces opérations sont [25] [28] :

- ❖ **Mondation** : Elle consiste à débarrasser la matière première d'origine de toutes les parties inutiles (mondation des amandes). [19]
- ❖ **Division grossière** : Opération nécessaire pour les produits volumineux car les appareils de broyage proprement dite n'acceptent les fragments solides qu'au-dessous d'une certaine taille. on peut avoir recours :
 - * Au concassage (marteaux, pilons) ;
 - * A la rasons (rabots, limes) ;
 - * A la section (coupe-racine). [20]
- ❖ **Dessiccation** : Pour les poudres d'origine animale ou végétale, les différentes opérations précédentes peuvent être suivies de dessiccation qui rendra plus facile. [20] le broyage ultérieur est parfois indispensable pour éliminer l'excès d'eau contenu. [17]
- ❖ **Congélation** : ou durcissement (*avec l'azote liquide*) de certains solides (*matériaux mous, collants, élastique, fibreux*) afin d'éviter toute élévation de la température pendant le broyage.

II.2.4 Mécanisme de broyage

Le principe sur lequel s'effectue l'opération de broyage est appelé mécanisme, Il existe différents mécanismes figure II.1 parmi lesquels on peut citer :

- ❖ ***Par compression*** : Des surfaces mobiles exercent une pression sur l'échantillon pris en sandwich. [21]
- ❖ ***Par choc et impact*** : L'échantillon est projeté contre une surface qui peut être fixe ou mobile à une vitesse extrêmement élevée. [17]
- ❖ ***Par friction*** : Lors du broyage par friction, l'échantillon est broyé entre deux surfaces par la pression verticale d'une de ces surfaces et le mouvement simultané de l'autre surface. [20]
- ❖ ***Par cisaillement*** : Des couteaux en rotation coupent l'échantillon entre les lames tranchantes ou pointues ou les couteaux fixes. [21]
- ❖ ***Par attrition ou abrasion*** : Il s'agit d'un frottement contre une surface rugueuse. Elle consiste à exercer sur la particule une force généralement par un mouvement circulaire et la différence par rapport à l'écrasement est le contact permanent du mobile avec les particules. [17]

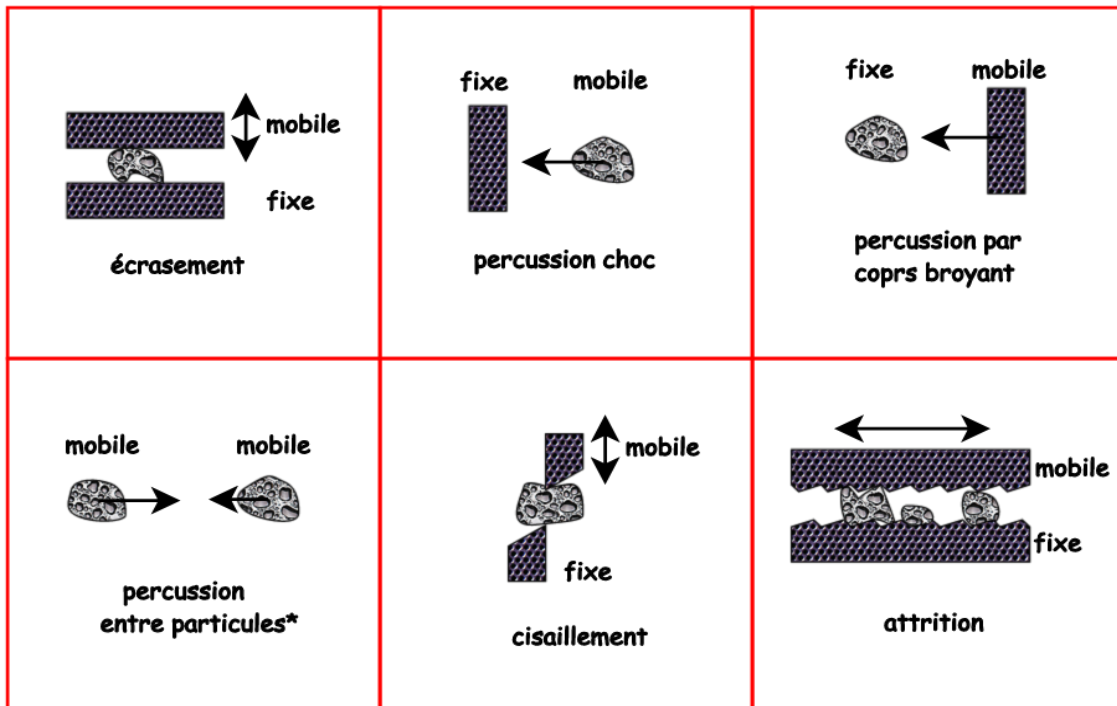


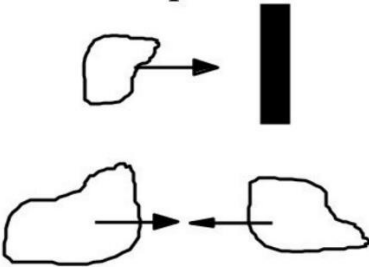
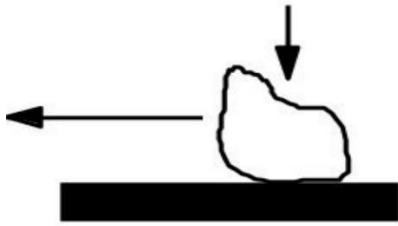
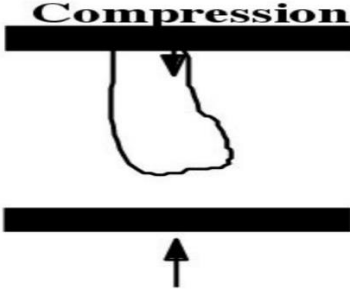
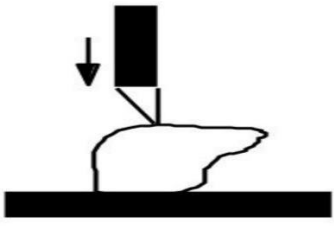
Figure II.1 Mécanismes de broyage.

II.2.5 Classification des broyeurs

On peut classés les broyeurs selon l’opération du broyage comme suit :

Tableau II.1 : Classification les différents types des broyeurs.

| Techniques de broyage | Mécanismes de broyage | Type de broyeur |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| <p>Compression</p> | <p>Compression</p> | <p>Concasseurs à mâchoires</p> |

| | | |
|---|----------------|---|
| <p style="text-align: center;">Impact</p>  | Choc et impact | <ul style="list-style-type: none"> *Broyeurs planétaires *Broyeurs à billes *Broyeur à disques oscillants *Broyeurs rapides à rotor *Broyeurs à marteaux |
| <p style="text-align: center;">Attrition</p>  | Attrition | <ul style="list-style-type: none"> *Broyeur à mortier *Broyeurs à disques |
| <p style="text-align: center;">Compression</p>  | Cisaillement | <ul style="list-style-type: none"> *Broyeurs à disques *Broyeurs rapides à rotor *Broyeurs à marteaux |
| <p style="text-align: center;">Découpage</p>  | Coupe | <ul style="list-style-type: none"> *Broyeurs à couteaux *Mixeur homogénéisateur à couteaux |

II.2.6 Caractéristiques des matériaux à broyer

Chaque procédé de broyage constitue à des caractéristiques, on site :

- ❖ **La dureté** : La dureté (ou inversement la fragilité) est vraisemblablement la propriété la plus couramment employée dans l'industrie. Elle traduit, au moyen de tests standardisés, la résistance du matériau à la propagation des fissures. On peut la définir

comme l'aptitude d'une particule à résister à la pénétration d'une autre. Cette propriété est classiquement représentée sur l'échelle de Mohs, qui permet de classer les différents Matériaux des plus fragiles aux plus durs. [22]

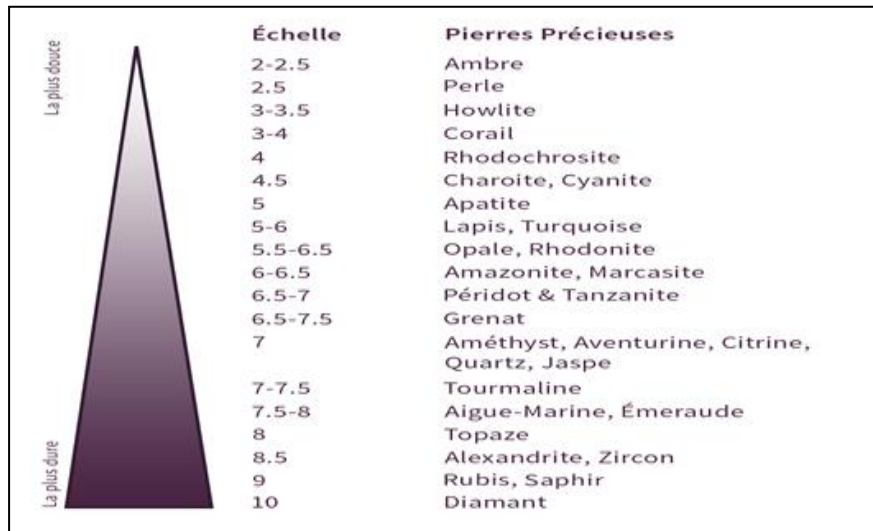


Figure II.2 : Echelle de dureté de Mohs.

- ❖ **L'abrasivité :** Cette propriété est intimement liée à la précédente : c'est l'aptitude d'un matériau à user une surface. Elle est d'une grande importance économique : elle conditionne l'usure du broyeur par le matériau à broyer et la contamination du produit qui en résulte. [22]
- ❖ **L'adhésivité :** L'adhésivité traduit l'aptitude des particules à se coller entre elles (agglomération) ou aux parois du broyeur. Cette caractéristique est liée à la taille et à la nature des particules ainsi qu'à leur taux d'humidité. [22]
- ❖ **La forme :** La forme, ou plus généralement la structure des particules, joue un rôle fondamental dans les procédés de broyage.
En effet, les propriétés d'usage des particules peuvent être liées à leur forme ; il conviendra alors de choisir le type de broyeur ayant le mode d'action convenable pour obtenir une forme donnée de particules. [22]
- ❖ **La distribution de la taille :** La distribution de taille des particules à broyer joue un rôle important dans le choix d'un broyeur, il sera notamment nécessaire d'envisager plusieurs étapes de fragmentation si le produit à broyer présente une distribution de tailles étalée. Par ailleurs il est rarement judicieux de vouloir broyer au maximum des possibilités d'une machine donnée ; en effet le sur broyage peut entraîner une ré-agglomération. [22]

II.2.7 Différents types de broyages

Comme tous les procédés, ils existent plusieurs types de broyage on cite :

- ❖ **Broyage simple** : Il n'y a pas d'autre impératif que celui de ramener la totalité de l'échantillon jusqu'en dessous d'un calibre déterminé (sans aucune considération de la granulométrie interne de deuxième produit), cela suffit lorsque par exemple, la réduction opérée a simplement pour but de rendre le produit plus aisément manutentionnable. [19]
- ❖ **Broyage poussé** : Le produit broyé doit contenir le maximum possible d'élément nettement plus fins que la limite supérieure imposée. En d'autres termes, l'échantillon broyé doit présenter une surface spécifique aussi élevée que possible (liants hydrauliques, perte de valeur). [19]
- ❖ **Broyage ménage** : En sens inverse du broyage applicable seulement, on peut avoir intérêt à chercher le moins de sur broyage possible.
Soit parce qu'il est inutile (dans ce cas l'économie de force motrice) soit même parce qu'il est nuisible (difficulté de récupération, perte de valeur). [19]
- ❖ **Broyage différentiel ou sélectif** : Ce mode de broyage applicable seulement à des produits structurellement hétérogènes, permet au prix de certaines précautions de pousser la réduction des constituants friables un peu plus loin que celle de constituants plus durs. [19]
- ❖ **Broyage formel** : Ce terme désigne les opérations de fragmentation au cours desquelles la forme des fragments obtenus a une influence sur la valeur du produit. La forme recherchée peut être :
 - * Soit celle de petits grains cubiques (cas des matières thermoplastique) ;
 - * Soit celle de fragments se rapprochant le plus possible la forme cuboïde (matériaux souliers, agrégats pour la fabrication de béton...etc.) pour lesquels le coefficient de forme est un des éléments du cahier des charges ;
 - * Soit au contraire, celle d'éléments plats paillettes ou écailles, telles que dans le cas des poudres de talc, graphite, pigment pour peinture, etc. [19]
- ❖ **Broyage autogène** : Il s'agit ici d'opérations de réduction volumique dans lesquelles les éléments du produit à broyer se fragmentent par percussion et frottement réciproques (self ou auto broyage). [19]

- ❖ **Broyage combinés** : Il arrive assez souvent que les opérations de fragmentations puissent être combinées dans un même appareil avec d'autres opérations plus ou moins complémentaires, on peut avoir :
- * Des broyeurs cribleurs ou broyeurs tamiseurs ;
 - * Des broyeurs séparateurs ou sélecteurs à courant d'air ;
 - * Des broyeurs sécheurs ;
 - * Des broyeurs mélangeurs ;
 - * Des broyeur dans lesquels débutent ou se poursuivent des réactions ; chimiques ou physiques (fabrication de l'alumine par le procédé broyer, Amal gâtion de minerais d'or, etc.). [19]

II.3 Appareils de broyage

Il est possible de les diviser en deux groupes :

II.3.1 Appareils de laboratoire

- ❖ **Mortier** : C'est l'instrument le plus utilisé pour les petites quantités ; mortiers de formes diverses, couverts ou non, en porcelaine, verre, fer, acier inoxydable.
- ❖ **Porphyres** : pour les poudres très fines. Ils sont constitués par une plaque en silice très dure. La poudre est écrasée à l'aide d'un pilon en acier ou une autre matière très dure.
- ❖ **Broyeurs à hélices, broyeurs à couteaux** : (type moulin à café ou mixer ménagers)
Ces appareils donnent d'excellents résultats et très rapide.
- ❖ **Tamis et cribles** : pour les substances très friables. Il suffit souvent pour les pulvériser de la frotter sur un tamis. Ce procédé est utilisé pour détruire les agglomérats de poudre. [10]

II.3.2 Appareils industriels

- ❖ **Broyeur à meules** : Meules (genre meules de moulin pour céréales) verticales ou horizontales figure II.3 et II.4. Avant l'utilisation généralisée des appareils à cylindres en meunerie, on utilisait des broyeurs où une meule en pierre mobile venait écraser le grain sur un plateau circulaire fixe. Les modes de fragmentation mis 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. [19]

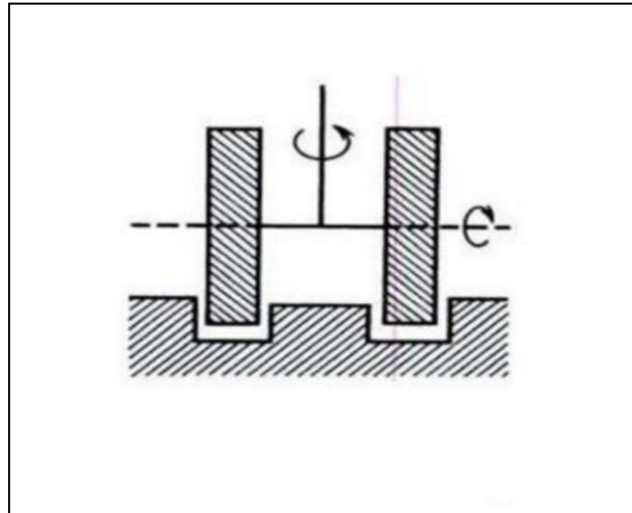


Figure II.3 : Broyeur à moule verticale.

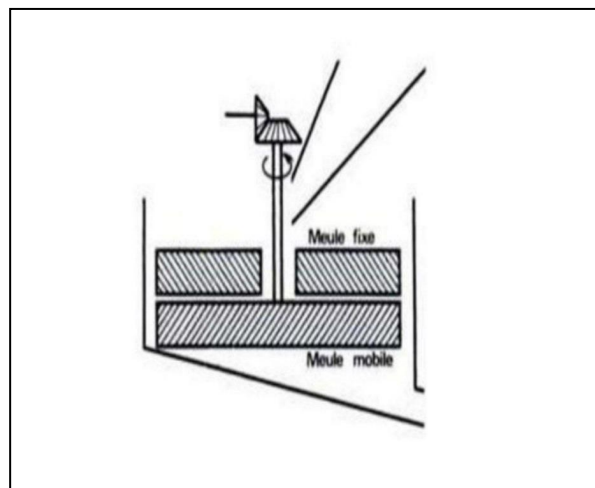


Figure II.4 : Broyeur à moule horizontale.

- ❖ **Broyeur cylindre cannelé ou lisse :** Très utilisés dans les industries agroalimentaires, 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. La surface des cylindres (lisses ou cannelés), leurs vitesses de rotation et leur écartement conditionnent la finesse de la mouture. Lorsque les cylindres sont lisses, compression et frottements sont les moteurs de la fracture tandis qu'avec des cylindres cannelés une action de cisaillement existe également. [21]

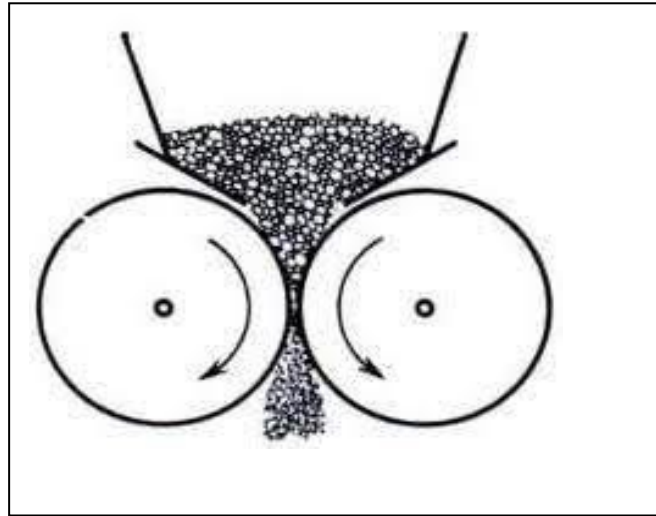


Figure II.5 : Broyeur cylindre lisse.

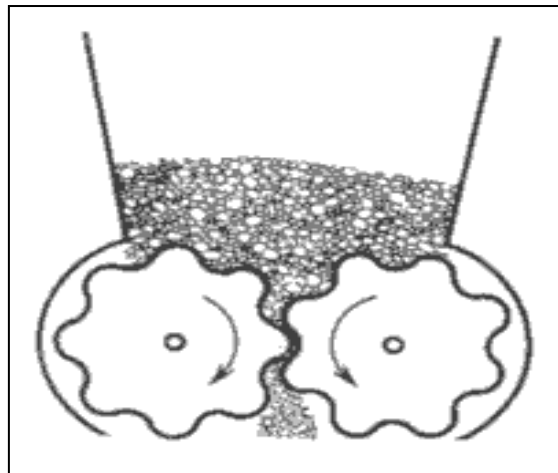


Figure II.6 : Broyeur cylindre cannelé.

- ❖ **Broyeurs à dents ou à pointes :** Le produit à broyer est déchiqueté par passage entre deux plaques métalliques circulaires et parallèles dont l'une est fixe tandis que l'autre tourne à grande vitesse autour de son axe. Les deux plaques sont hérissées de pointes ou de dents disposées en cercles concentriques autour de l'axe de rotation. [19]

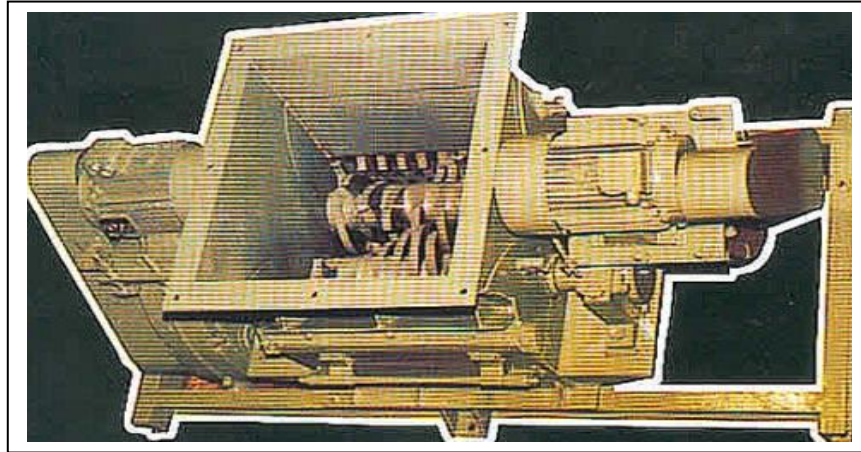


Figure II.7 : Broyeur à dents.

- ❖ **Broyeur à boulets :** Le broyeur à boulets est très utilisé pour obtenir des produits fins. Il est constitué d'une cuve mobile (en rotation autour d'un axe vertical ou horizontal). On introduit le produit à broyer dans la cuve (selon la taille voulue). ces cuves et billes sont en acier inoxydable. [15] Pour un bon fonctionnement, le taux de remplissage ne soit pas excéder 30 %. la vitesse de rotation doit être judicieusement choisie afin que les chocs soient efficaces.

Le broyeur à boulets est simple à mettre en œuvre, mais il consomme beaucoup d'énergie. Le matériau des boulets doit être compatible avec la charge à broyer, car leur usure provoque une pollution du produit. Enfin ce type de broyeur provoque un échauffement intense, que doit pouvoir supporter le produit. [25]

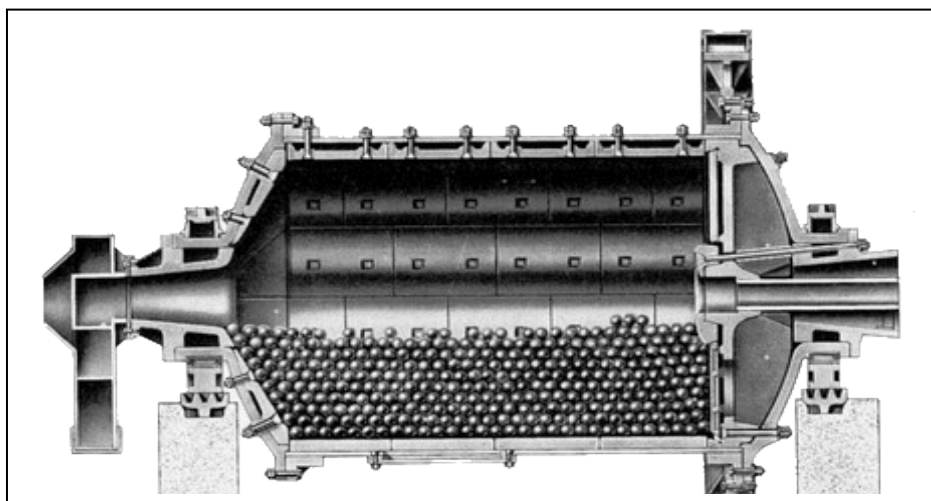


Figure II.8 : Broyeur à boulets.

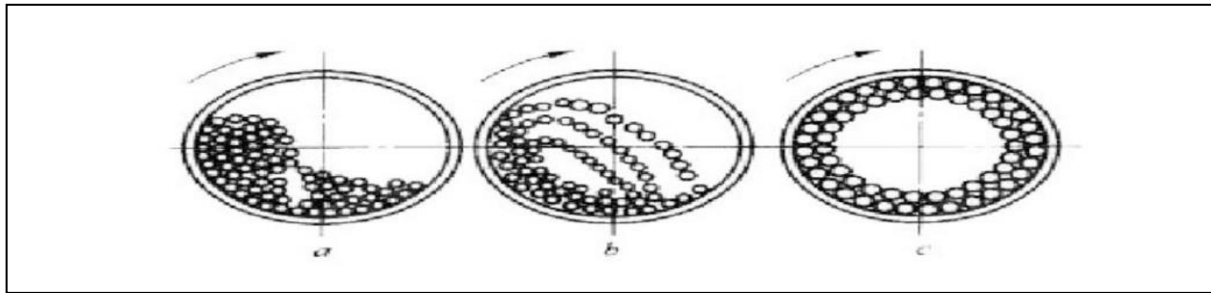


Figure II.9 : Mouvements des broyeur à boulets.

- ❖ **Broyeurs à mâchoire :** Les broyeur à mâchoires servent à concasser et pré broyer rapidement et soigneusement de manière grossière et fine des matériaux mi-durs, durs, cassants et coriaces. En raison de différents modèles, de leur puissance et de leur sécurité, ils sont idéals pour la préparation des échantillons au sein des laboratoires et des entreprises. Le débit et la finesse finale dépendent du type de l'appareil, de la largeur réglée de la fente et des comportements à la rupture du produit à broyer. [22]

Les mouvements sont réglés par un excentrique qui diminue rythmiquement l'espace qui sépare les mâchoires entre lesquelles le produit à broyer doit passer. [19]

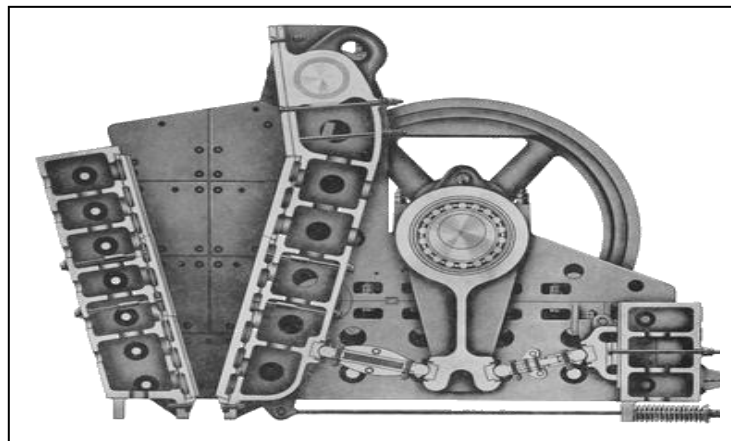


Figure II.10 : Broyeur à mâchoire.

- ❖ **Broyeurs à marteaux :** Ils produisent une réduction de taille par impact entre les particules et une surface dure. Les principaux facteurs régissant sur le procédé sont :
 - * la taille et la forme du tamis associé ;
 - * le type de marteaux ;
 - * la vitesse périphérique des marteaux (20 à 60m.s-1). [21]

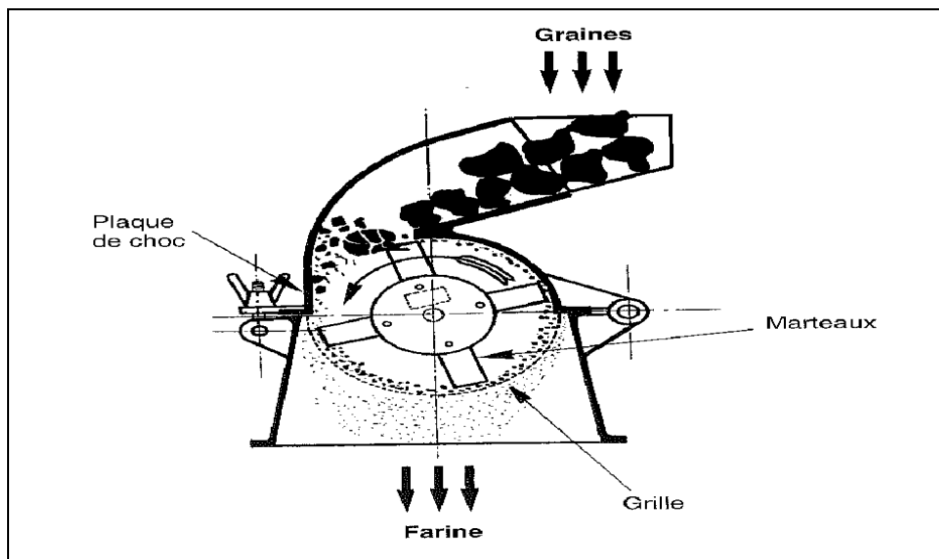


Figure II.11 : Broyeur à marteau.

- ❖ **Broyeurs planétaires à boulets :** sont parfaitement adaptés au broyage par voie humide et par voie sèche de matériaux durs à mi-durs, cassants et fibreux. Ces broyeurs traitent des échantillons allant de quelques milligrammes jusqu'à plusieurs kilogrammes et atteignent des finesses allant au-dessous de 1 μm . Ils sont parfaitement fiables, particulièrement simples à manipuler et faciles à nettoyer. [20] Les récipients tournent autour d'un axe situé à l'extérieur. Les boulets tournent autour du récipient qui tourne elle-même à très grande vitesse autour de l'axe extérieur. [24]



Figure II.12 : Broyeur planétaire à boulet.

- ❖ **Broyeurs à mortier** : Le broyeur à mortier est un broyeur universel qui permet de traiter des matériaux très divers : mi-durs, mous, cassants, fibreux, sensibles à la température et humides. Le pilon fragmente l'échantillon en douceur en exerçant pression et friction sur la paroi et sur le fond du mortier. Le broyage est réalisable à sec ou en suspension. Le broyeur à mortier est également idéal pour mélanger et homogénéiser des échantillons organiques et inorganiques. Pour éviter des phénomènes d'abrasion indésirables, les garnitures de broyage disponibles sont en sept matériaux différents. [26]



Figure II.13 : Broyeur à mortier.

- ❖ **Broyeurs à percussion** : Le Concasseur à percussion, souvent utilisé pour le concassage secondaire. Parmi les séries existantes on peut citer la série PF qui est le concasseur à percussion le plus récent et le Plus populaire et qui fournit une solution cliente à faible coût, des performances Exceptionnelles, un bon aspect esthétique, un faible coût à l'échelle des autres matériaux. Concasseurs à percussion sont mieux adaptés aux traitements de calcaire et largement Utilisé dans le concassage du minerai, ferroviaire, produits chimiques, du ciment, de construction et autres industries. [22]

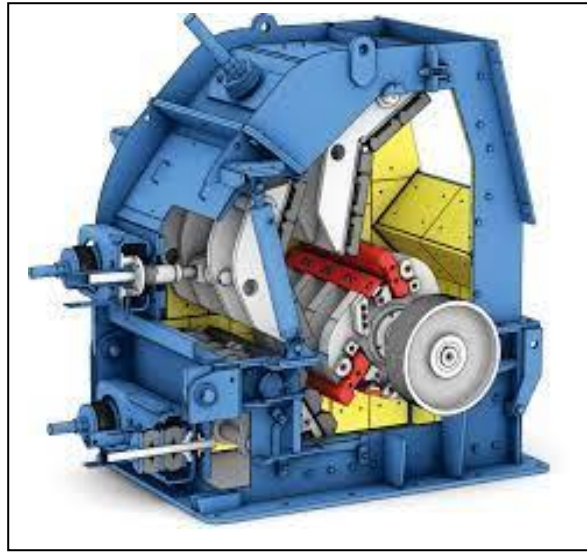


Figure II.14 : Broyeur à percussion.

- ❖ **Broyeurs à couteaux** : Parfois appelés granulateurs, ils mettent en œuvre un système rotor-stator qui cisaille le produit broyé. Leur capacité de production dépend de la puissance fournie (de l'ordre de 250 à 1500 Watts), de la vitesse du rotor ainsi que de la longueur et du nombre des couteaux dont la forme peut aussi éventuellement varier. 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. Les tailles obtenues sont généralement de l'ordre de 1 à 6 mm à titre indicatif, les débits peuvent être très importants et dépasser plusieurs dizaines de tonnes à l'heure comme lors du broyage des betteraves en sucrerie. Certains appareils sont munis de dispositifs d'alimentation permettant d'introduire des pièces de grandes tailles. [21]



Figure II.15 : Broyeur à couteaux.

- ❖ **Broyeur à rotor :** Ce système se présente sous la forme d'un axe tournant sur lequel des lames (interchangeables ou non) sont fixées. Il permet de couper de branches de gros diamètre pour donner un broyat grossier, idéal pour le compostage. Son silence relatif est également un avantage, tout comme sa facilité de nettoyage grâce à la possibilité d'inverser le sens de rotation du rotor. Cependant, son débit est assez faible et il s'accommode moins bien des déchets frais et des feuilles, comparativement au plateau tournant. [26]



Figure II.16 : Broyeur à rotor.

II.4 Facteurs intervenant dans le 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 :[23]

II.4.1 Propriétés de la substance à broyer

- ❖ La dureté ;
- ❖ La friabilité ;
- ❖ L'élasticité ;
- ❖ Le taux d'humidité ;
- ❖ La nature du principe actif et sa sensibilité à la chaleur peuvent aussi intervenir car certains broyeurs provoquent une élévation de température appréciable. [24]

II.4.2 Taille des particules à broyer et celles des particules à obtenir

Chaque appareil de broyage a un rapport de réduction déterminé .[24]

II.4.3 Forme des particules à obtenir

La forme des particules à obtenir varie avec le procédé de pulvérisation. [24]

II.4.4 Rendement

L'appareil choisi doit assurer un rendement convenable. Le fonctionnement peut être continu ou discontinu. [24]

II.4.5 Capacité d'admission

Les dimensions de la chambre d'alimentation varient selon le type de broyeur utilisé : Pour les broyeurs à marteaux ils peuvent arriver à H=1000 ; l = 1800 ; L=3200 mm, pour les Broyeurs à plaques de chocs H = 400 ; l =1200 ; L=2900 mm. Après cette étude, on a retenu la solution d'un broyeur à marteaux vu qu'elle répond aux exigences demandées.[22]

II.4.6 Performance, usage et prix

Le rapport de réduction de destruction des matériaux varie selon la technique utilisée. Il Est de 10 à 12 pour le broyeur à barres ou plaques de choc, par contre, de 20 à 30 pour le broyeur à marteaux.

Le débit est lui aussi très variable : de 100 à 2000 t/h pour les broyeurs à marteaux, de 40 à 800 t/h pour les broyeurs à barres ou plaques de choc et seulement de 150 kg/h à 120t/h pour les broyeurs à galets. [22]

CHAPITRE III

CHPITRE III

LE TAMISAGE

III.1 Introduction

Généralement, après le broyage, la poudre doit subir un tamisage pour séparer les particules trop grosses des plus fines. Ce calibrage est effectué grâce à des tamis.

Dans ce chapitre, nous expliquer le processus de tamisage, sa définition et son but, son principe, ainsi que les différents équipements utilisés.

III.2 Le tamisage

L'origine du mot tamis est incertaine le terme *tamiseur*, du bas latin, a été employé pour décrire un crible qui permet de tamiser la farine ou le grain. Le mot s'enrichit peu à peu de sens nouveaux, tandis qu'apparaissent les tamis fins, les tamis gros ou les tamis déliés.

On se sert du tamis non seulement pour passer la farine et la poudre, mais encore les liqueurs épaisses. Au XIXe siècle on trouve le terme employé pour décrire une sorte de filet de pêche fait d'un cylindre de bois dont le fond est maillé pour laisser passer l'eau et retenir le poisson, et d'une pièce en bois criblée de trous qui maintient les tuyaux dans un jeu d'orgues. Le terme sert aujourd'hui à désigner la partie maillée d'une raquette de tennis ou de badminton. On utilise des tamis en cuisine, notamment en pâtisserie pour tamiser la farine et éviter la formation de grumeaux ou dans la préparation du thé au Japon; des tamis en bois superposés posés dans un bain-marie servent à la cuisson-vapeur. Il faut noter aussi que depuis longtemps une gamme de tamis est utilisée dans notre société pour la préparation du couscous à base de semoule. [29]

Le maillage du tamis peut être en métal, en crin, voire en soie les tamis modernes sont en métal ou nylon, moins facilement corrodé. Le tamisage est l'une des plus anciennes méthodes, et encore très largement utilisée. [29]

Aujourd'hui, de nombreuses industries font recours au tamis dans le processus de fabrication de leurs produits il constitue l'étape la plus fastidieuse dans la préparation d'une poudre de bonne granulométrie.

Le tamisage se fait par voie sèche (passage des particules plus fines à travers les mailles par secousses) ou par voie humide (entraînement des particules plus fines par l'eau), ce dernier procédé est utilisé dans l'orpaillage.

III.2.1 Définition et but

Le tamisage est l'opération qui suit la pulvérisation, il est effectué soit à la sortie même du broyeur, soit après le broyage grâce à des tamis. La poudre subit généralement un tamisage pour séparer les particules trop grossières qui doivent subir un nouveau traitement de pulvérisation. [29]

On emploie pour cela soit des tamis de formes variées, ronds, carrés ou rectangulaires, agités à la main ou mécaniquement et le plus souvent couverts pour éviter la dissémination dans l'atmosphère, soit des cribles constitués par des plaques métalliques percées de trous circulaires régulièrement répartis sur toute leur surface. Le diamètre des trous est égal à 1.25 fois la largeur des mailles carrées correspondantes. [5]

➤ Pourquoi tamiser les poudres ?

Le tamisage des poudres est utile pour en retirer les corps étrangers ou les agglomérats dans le but de : respecter des normes de qualité ; garantir une granulométrie ; faciliter leur pesage et leur dosage ; éviter la présence de particules trop fines ou trop grosses dans un produit fini. [3]

Le Tamisage est une opération effectuée à l'aide d'un ou plusieurs tamis dans lequel les éléments d'un granulat vont passer pour être triés. Par Tamisage, les éléments sont séparés selon leur grosseur, leur granulométrie.

Le tamisage est un mécanisme physique d'élimination des particules, où une particule se voit refuser l'accès à travers un port ou un passage qui est plus petit que la particule elle-même. C'est une technique simple pour séparer des particules de différentes tailles. Un tamis tel que celui utilisé pour tamiser la farina a de très petits trous. Les particules grossières sont séparées ou brisées par broyage les unes contre les autres et les ouvertures. Selon les types de particules à séparer, des tamis avec différents types de trous sont utilisés. [3]



Figure III.1 : Une tamiseuse.

Un mélange mécanique contient des composantes de différentes tailles. Un tamis être utilisé pour séparer ce genre de mélange. Il s'agit d'un instrument qui comporte de nombreux trous qui servent à séparer les composantes d'un mélange. Les plus petites composantes du mélange passent à travers les trous, tandis que les plus grosses restent au-dessus. Cette méthode, appelée tamisage, fonctionne également dans le cas d'un mélange constitué de composantes solides et liquides. Les composantes liquides, et possiblement certaines petites composantes solides, passent à travers les trous, mais le tamis retient les plus grosses composantes solides.

III.2.2 Principe

Le tamisage est l'une des plus anciennes méthodes d'analyse granulométrique, et aussi l'une des plus largement utilisées car il est peu coûteux. Son principe de base consiste à diviser un matériau pulvérulent en le faisant passer à travers un (ou plusieurs) tamis dont les caractéristiques sont connues. [30]

Un échantillon est déposé au sommet d'un empilement de 7 à 16 tamis, dont la dimension des mailles va décroissant, et auquel on applique un mouvement vibratoire manuel ou mécanique. Les particules dont deux dimensions sont inférieures aux dimensions des ouvertures traversent le tamis lorsqu'il est mis en vibration (le passant), alors que les particules les plus grosses sont retenues (le refus). Les particules se répartissent de manière inégale sur chacun des tamis. Les fractions retenues sur chacun des tamis sont ensuite pesées pour déterminer la distribution granulométrique. [30]

La variable caractéristique de séparation est en raison de la forme irrégulière des particules, le diamètre équivalent à celui de la sphère la plus grosse passant géométriquement à travers les mailles du tamis considéré.

L'hors du tamisage on appelle :

- Refus sur un tamis : la quantité de la matière qui est retenue sur le tamis.
- Tamisât (ou passant) : la quantité de la matière qui passe à travers le tamis.

III.3 Tamis

Un tamis est formé par un tissage de fils qui laissent libres entre eux des intervalles libre appelés ouverture ou maille. Pour un contrôle granulométrique, la maille doit être régulière et aussi peu déformable que possible. Généralement les tamis de contrôle sont en fils de métal fixés à un bord rigide cylindrique. [5]

La distance entre deux fils ou mailles correspond à une dimension précise, exprimée en micromètre, qui définit le numéro du tamis correspondant.

Les tamis industriels sont fréquemment constitués de tôles perforées à trous ronds, figure III.2, mais il existe aussi d'autres formes comme :

- * Tamis toile métallique tissée ;
- * Tamis fond perforée ;
- * Accessoires de tamis (fond, bagues, couvercles) ;
- * Tamis à maille en nylon ;
- * Tamis de forme spéciale ;
- * Tamis grille à fentes.



Figure III.2 : Différents types de tamis.

III.3.1 Tamis normalisés

Les séries de tamis normalisés ont été proposées pour la première fois en 1867 par Rittinger. On trouvera dans la norme AFNOR NF X 11-508 de septembre 1983 la définition des séries de tamis normalisés ainsi que la correspondance entre la norme AFNOR et les normes étrangères.

[3]

III.3.2 Ouverture de maille et pourcentage de vide

Pour une ouverture de maille constante, le choix du diamètre de fil est important car il détermine le pourcentage de vide et le débit de tamisage d'un tissu métallique. Plus le fil est fin plus le pourcentage de vide est important ; par conséquent, le débit potentiel de tamisage augmente. Mais, parallèlement, la durée de vie du tamis diminue. Il faut donc trouver un compromis entre le pourcentage de vide et la durée de vie du tamis. [31]

Le pourcentage de vide décroît avec la taille des ouvertures, passant de 2.4% pour les tamis de 5 μm à 31.5% pour ceux de 40 μm ; il en résulte une forte augmentation du temps de tamisage lorsqu'on utilise les tamis les plus fines. [28]

III.3.3 Classification des tamis

Chaque tamis est actuellement désigné par un numéro qui correspond au côté, exprimé en micromètres, du carré formé par le vide intérieur de chaque maille. La pharmacopée donne une liste de tamis de contrôle avec les limites tolérées pour les ouvertures et pour le diamètre des fils pour chacun d'eux comme le montre le tableau III.1.

Tableau III.1 : Tamis de contrôle. [5]

| Numéros des tamis (dimensions nominales des ouvertures) | Tolérance sur les ouvertures | | | Diamètre du fil | | |
|---|---|---|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------|
| | Tolérance maximale sur une ouverture +X | Tolérance sur la moyenne des ouvertures $\pm Y$ | Tolérance intermédiaire + Z | Dimensions nominales recommandées d | Dimensions limites admissibles | |
| | | | | | d_{max} | d_{min} |
| 11 200 | 770 | 350 | 560 | 2 500 | 2 900 | 2 100 |
| 8 000 | 600 | 290 | 430 | 2 000 | 2 300 | 1 700 |
| 5 600 | 470 | 180 | 320 | 1 600 | 1 900 | 1 300 |
| 4 000 | 370 | 130 | 250 | 1 400 | 1 700 | 1 200 |
| 2 800 | 290 | 90 | 190 | 1 120 | 1 700 | 950 |
| 2 000 | 230 | 70 | 150 | 900 | 1 040 | 770 |
| 1 400 | 180 | 50 | 110 | 710 | 3 820 | 600 |
| 1 000 | 140 | 30 | 90 | 560 | 640 | 480 |
| 710 | 112 | 25 | 69 | 450 | 520 | 380 |
| 500 | 89 | 18 | 54 | 315 | 360 | 270 |
| 155 | 72 | 13 | 43 | 224 | 260 | 190 |
| 250 | 58 | 9.9 | 34 | 160 | 190 | 130 |
| 180 | 47 | 7.6 | 37 | 125 | 150 | 105 |

| | | | | | | |
|-----|----|-----|----|----|-----|----|
| 125 | 38 | 5.8 | 22 | 90 | 104 | 77 |
| 90 | 32 | 4.6 | 18 | 63 | 72 | 54 |
| 63 | 26 | 3.7 | 15 | 45 | 52 | 54 |
| 45 | 22 | 3.1 | 13 | 32 | 37 | 27 |
| 38 | - | - | - | 30 | 35 | 24 |

On utilise actuellement divers séries d'ouvertures, que l'on peut caractériser comme grosses (4 à 100 mm), moyennes (0.2 à 4 mm) et fines (moins de 0.2 mm). La première catégorie, qui reçoit des charges de 50 à 100 kg de poudre, fait appel à de puissantes machines à tamiser. On trouve dans le commerce une gamme de machines utilisables pour les tamis à ouverture moyenne ; elles permettent généralement de classer la poudre en cinq ou six tailles ; les charges vont de 50 à 100 g. la série fine descend jusqu'à 37 μ m avec des tamis de toile métallique.

La pharmacopée donne une définition pour un certain nombre d'adjectifs classiquement utilisés pour caractériser la granulométrie des poudres, sur le tableau III.2. Les chiffres indiqués pour les poudres grossières, modérément fines, fines et très fines sont ceux de la pharmacopée européenne qui ne définit pas pour le moment les poudres extrafines et micro fines. [5]

La finesse d'une poudre peut être exprimée à l'aide d'un seul ou de deux numéros de tamis :

- Un seul numéro : le tamis doit laisser passer au moins 97% ;
- Deux numéros :
 - le tamis le plus grand laisse passer au moins 95% ;
 - Le tamis le plus petit au maximum 40%.

Tableau III.2 : Classification des poudres. [5]

| Dénomination Des poudres | Le résidu sur le tamis n°... ne dépasse pas 5 % | Il ne passe à travers le tamis n°... qu'un maximum de 40% |
|-------------------------------------|--|--|
| Poudres grossières | 1400 | 355 |
| Poudres modérément fines | 355 | 180 |
| Poudres fines | 180 | 125 |
| Poudres extra fines | 90 | La poudre, examinée au microscope ne présente pas de 10% de particules d'une taille inférieure à 30 μ m. |

| | | |
|---------------------|---|--|
| Poudres micro fines | La poudre passe en totale à travers le tamis 90 dans le cas où le tamisage n'est pas réalisable l'absence de particules d'une taille égale ou supérieure à 90 µm doit être réalisée par examen au microscope. | Examinée au microscope, la poudre ne présente pas plus de 1% de particules d'une taille supérieure à 25 µm et pas plus de 10% des particules d'une taille égale ou supérieure à 50 µm. |
|---------------------|---|--|

III.4 Méthodes de tamisage

Le tamisage peut être effectué par voie sèche ou humide, à la main ou à la machine. Certaines machines font appel à un mécanisme qui combine la rotation et les chocs, d'autre à un dispositif vibrant. Il existe aussi des machines automatiques qui utilisent un jet d'air pour colmater les tamis, ou une émission d'ultrasons pour dégager les ouvertures.

Il faut noter que toute opération de tamisage est influencée par les facteurs suivants [3] :

- * Forme des ouvertures ;
- * chargement du tamis ;
- * présence de particules fines ;
- * méthode d'agitation ;
- * durée de tamisage ;
- * forme des particules ;
- * cohésion de la poudre ;
- * friabilité.

III.4.1 Tamisage à la main

Bien que le tamisage à la main soit fastidieux, il est nécessaire de l'employer pour obtenir des résultats fiables dans le cas du tamisage à sec.

Le tamisage d'une poudre est sans aucun doute l'étape la plus fastidieuse dans la préparation d'une poudre de bonne granulométrie. Le tamisage manuel est un tamisage de référence et moins onéreux. On utilise pour cela un jeu de tamis calibrés qui seront empilés pour retenir à chaque étage la section de grains dont le diamètre est compris entre son propre calibre et celui du dessus (ex. dessus > 250 µm > 100 µm > 50 µm > fond).

III.4.2 Tamisage à la machine

Le tamisage se fait à l' aide de la machine en disposant les tamis en descendant du plus petit tamis , puis on met la poudre sur le tamis le plus haut , puis on ferme la machine et on ajuste le mouvement mécanique et le temps nécessaire au processus de tamisage , et à la fin nous pesons la sortie de chaque tamis.

III.4.3 Tamisage par voie humide

La plupart des analyses par tamisage sont effectuées par voie sèches. Mais il existe quelques applications qui ne peuvent être effectuées que par le tamisage humide, comme dans le cas d'une suspension qui ne doit pas être séchée ; ou un échantillon de poudres très fines qui tendent à s'agglomérer (la plupart du temps $< 45\mu\text{m}$). [3]

III.4.4 Tamisage avec jet d'air

Le tamisage par jet d'air consiste à déplacer la matière seulement à l'aide d'un courant d'air. Cette méthode de tamisage est rapide et n'altère pas le matériau, elle est essentiellement utilisée pour les matières très fines qui ont tendance à s'agglomérer étant donné qu'elles sont très bien dispersées par le courant d'air pulsé sans jamais obstruer les mailles du tamis. Ce procédé de tamisage consiste à faire passer à travers un filtre un courant d'air ascendant fourni par une fente tournante, de manière à fluidiser la matière qui se trouve sur le filtre. En même temps, on applique une pression négative au fond du filtre pour recueillir les particules fines sur du papier-filtre, figure III.3. Cette technique réduit la tendance au colmatage ; de plus, le tamisage est très peu brutal, ce qui permet de traiter les matériaux cassants et fragiles. Il est possible de tamiser certaines poudres jusqu'à $10\ \mu\text{m}$. [3]

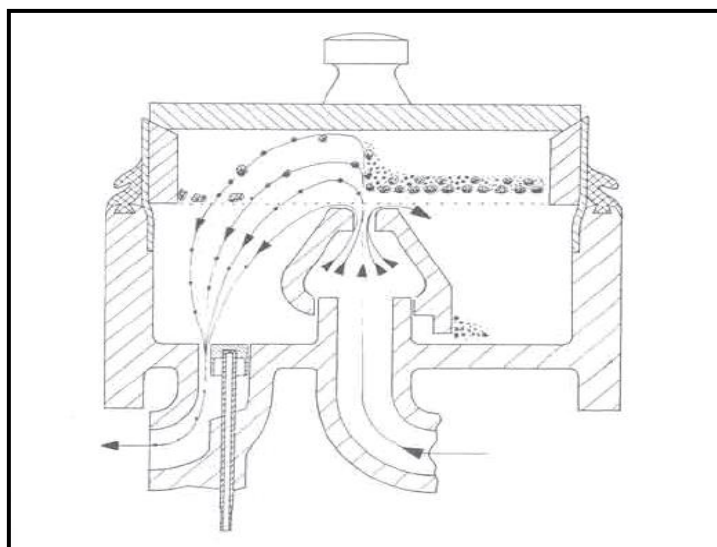


Figure III.3 : Principe de fonctionnement du tamis Alpine à jet d'air.

III.4.5 Tamisage par ultrasons

Le tamisage par ultrasons est une technologie éprouvée qui démontre ses avantages depuis de nombreuses années avec des tamis traditionnels (industrie pharmaceutique, chimique, alimentaire, de la peinture/revêtement en poudre, de l'emballage et du plastique). Désormais, cet équipement peut également être intégré dans des tamis à cyclone existants. . [32]

➤ Les atouts du tamisage par ultrasons

Les vibrations ultrasons réduisent les frictions entre la gaze et la poudre. Toute agglomération et obstruction est ainsi évitée, le débit augmente et le processus général de séparation est amélioré.

- * Hausse significative du débit (jusqu'à 10x) grâce à la diminution de la friction ;
- * Produit fini de meilleure qualité grâce à des mailles plus fines ;
- * Qualité consistante et grande précision de tamisage grâce à la minimisation des obstructions ;
- * Capacité élevée grâce à la réduction des zones mortes ;
- * Minimisation des déchets grâce à la réduction des agglomérats ;
- * Produit fini de meilleure qualité grâce à la suppression efficace de résidus de salissure ;
- * Moins de déchets grâce à une durée de vie plus longue ;
- * Facile à intégrer dans une installation existant (tamis traditionnel ou à cyclone) ;
- * Très fiable ;
- * Amortissement rapide. [32]

III.5 Appareillage de tamisage

L'appareil dans lequel s'effectue l'opération de tamisage est appelé *tamiseuse*.

Le développement technologique a permis l'apparition de plusieurs types de tamiseuses destinées à l'utilisation industrielle, ces dernières sont classifiées selon le mode de tamisage adopté ; dans ce qui suit on va présenter certaines tamiseuses, leur description, leur principe de fonctionnement, ainsi que leur domaines d'application.

III.5.1 Tamiseuse de contrôle L'AS

Il existe différents modèles de tamiseuses types as dont on peut distinguer :

- * **L'AS 200 control :**

Les tamiseuses analytiques de la série AS 200 sont utilisées dans la recherche et le développement, le contrôle qualité des matières premières, des produits intermédiaires et finis ainsi que dans le suivi de la production. L'entraînement électromagnétique contrôlable permet une adaptation optimale pour chaque produit. Des fractions nettes sont obtenues même après des temps de tamisage très courts.^[33]

Tableau III.3 : Caractéristiques d'AS 200 control. ^[33]

| | |
|--|--|
| Applications | Séparation, fractionnement, détermination de la granulométrie |
| Champ d'application | Agriculture, alimentation, biologie, chimie / plastique, environnement / recyclage, géologie / métallurgie, ingénierie / électronique, matériaux de construction, médecine / produits pharmaceutiques, verre / céramique |
| Matière chargée | Poudres, matières en vrac, suspensions |
| Plage de mesure* | 20 µm - 25 mm |
| Mouvement de la matière à tamiser | Projection à impulsion rotative |
| Charge / quantité max. de matière à tamiser | 3 kg |
| Nombre max. de fractions | 11 /22 |
| Poids max. de la colonne de tamis | 6kg |



Figure III.4 : Tamiseuse AS 200 control.

*** L'AS 300 control :**

Elle présente le même avantage que l'AS200 mais elle se caractérise par la très grande charge d'alimentation (environ 6kg susceptible d'être séparée en une seule opération). ^[33]

Tableau III.4 : Caractéristiques d'AS 300 control. ^[33]

| | |
|--|--|
| Applications | Séparation, fractionnement, détermination de la granulométrie |
| Champ d'application | agriculture, alimentation, biologie, chimie / plastique, environnement / recyclage, géologie / métallurgie, ingénierie / électronique, matériaux de construction, médecine / produits pharmaceutiques, verre / céramique |
| Matière chargée | Poudres, matières en vrac, suspensions |
| Plage de mesure | 20 μm - 40 mm |
| Mouvement de la matière à tamiser | Projection à impulsion rotative |
| Charge / quantité max. de matière à tamiser | 6 kg |
| Nombre max. de fractions | 11 / 17 |
| Poids max. de la colonne de tamis | 10 kg |



Figure III.5 : Tamiseuse L'AS 300 control.

*** L'AS 400 control :**

Est utilisé pour le tamisage sec avec des tamis d'un diamètre allant jusqu'à 400 mm En cela, le mouvement circulaire horizontal uniforme assure une séparation exacte des produits fins et gros. Grâce au réglage numérique des paramètres et à son certificat de calibrage, l'AS 400 control est indispensable pour tous ceux qui accordent de l'importance à la précision et au confort d'utilisation ou qui travaillent en conformité avec les normes ISO 900. Exemple d'application : sable, copeaux de bois, matériaux de construction, maïs moulus, plastiques. [33]



Figure III.6 : Tamiseuse L'AS 400 control.

* **L'AS 450 control :**

Est la première tamiseuse à mouvements oscillatoires à trois dimensions pour des tamise 400 mm et 450 mm de diamètre. Elle convient pour le tamisage à l'état sec et humide, quelle que soit la charge, jusqu'à 25 kg de matière à tamiser.

C'est ainsi que l'AS 450 control surpasse nettement toutes les tamiseuses en vente sur le marché avec des entraînements électromagnétiques conventionnels ou par moteurs vibrants déséquilibrés.

Exemples d'applications : Charbon, Coke, Produits chimiques, Sable, clinker de ciment, matière de remplissage, matériaux de construction, minerais, minéraux, plastiques, sols... [33]



Figure III.7 : Tamiseuse L'AS 450 control.

* **L'AS 200 jets :**

Convient notamment pour la séparation de poudres fines qui requièrent un brassage et un dé agglomération efficaces. La possibilité de mémoriser jusqu'à 10 SOP ainsi que le régulateur automatique de la dépression (accessoire) garantissent des résultats reproductibles et significatifs. Des fonctions innovantes comme la fonction « Open Mesh », la vitesse de rotation variable de la buse ainsi que l'utilisation optionnelle de tamis à cadre de 50 mm de haut perfectionnent la nouvelle technologie de tamisage par jet d'air.

Exemples d'applications : aliments, caoutchouc, cosmétiques, céramique, lessive en poudre, minéraux, pigments, plastiques, produits chimiques, produits pharmaceutiques, revêtement en poudre, toner. [33]



Figure III.8 : Tamiseuse L'AS 200 jets.

*** L'AS 200 TAP :**

Est utilisée dans les domaines de la Recherche et du Développement, du contrôle de la qualité des matières premières, des produits intermédiaires et finis ainsi que pour la surveillance de la production. L'AS 200 TAP sert avant tout à déterminer conformément aux normes prescrites la granulométrie de produits spéciaux tels que, par exemple, le charbon actif, les abrasifs, les poudres métalliques, les épices et les diamants. [33]



Figure III.9 : Tamiseuse 200 TAP

III.5.2 Tamiseuse a vibrations

* **Analyste 3PRO:**

La tamiseuse analyste 3 PRO vous offre tout ce dont vous avez besoin pour déterminer rapidement au laboratoire la répartition granulométrique dans des échantillons. L'appareil pourvu d'un entraînement électrique à excentrique déplace la colonne de tamisage verticalement selon un régime vibratoire contrôlé. Il constitue une solution idéale pour traiter des échantillons jusqu'à 2 kg sur une plage de tamisage de 5 μm à 63 mm l'analyste 3 PRO convient remarquablement bien pour contrôler rapidement la qualité à la réception et à l'expédition marchandises, elle est particulièrement confortable à utiliser, silencieuse, est robuste et offre une longue durée de vie. [34]



Figure III.10 : Analyse 3PRO.*** Analyste 3SPARTAN :**

La petite sœur de l'analyste 3 PRO pour toutes les opérations courantes au laboratoire avec réglage optique de l'amplitude sur l'appareil en fonctionnement. Un ensemble complet avec le dispositif de serrage très pratique de et la possibilité d'effectuer automatiquement l'analyse du tamis.[34]

**Figure III.11** : Tamiseuse analyste 3SPARTAN.**III.5.3 Tamiseuse à haute performance :***** Analyste 18 :**

Elle traite sans difficulté jusqu'à 15 kg de produits entre 20 μm et 125 mm Le mouvement tridimensionnel du tamis donne des résultats particulièrement rapides, sans post-tamissage manuel Le tamisage efficace de grandes quantités est une tamiseuse robuste pour service intense. Et une précision en répétition optimale. [34]

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV

PROCEDURE EXPERIMENTALE RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction

Dans ce travail on a choisi d'étudier les opérations de broyage et de tamisage de quelques échantillons solides à différents types.

Des expériences ont été établies dans le but d'investiguer l'effet de certains paramètres sur ces deux procédés. Ces expériences ont été réparties en deux étapes principales :

- La première consiste à étudier l'effet de paramètres de broyeur de deux types (*pulvérisette 14 (35)* et mixeur) sur l'opération du broyage (soit le temps du broyage, le choix du broyeur) ;
- La deuxième concerne l'étude des paramètres de tamiseuses (soit le temps de tamisage, la fréquence de vibration, le choix entre deux types de tamis) ;

IV.2. Matériels et produits utilisés

IV.2.1 Matériels

Dans cette étude on a utilisé un broyeur mixeur présenté sur la figure IV.1 et les résultats d'un broyeur à rotor (35) (*pulvérisette 14 « Fritsch »*) présenté sur la figure IV.3.



Figure IV.1 : Broyeur mixeur.

L'opération de broyage a été réalisée à l'aide d'un broyeur utilisée dans nombreux domaines.



Figure IV.2 : Chambre de broyage.

Pour faire la comparaison entre deux types de broyeur on a utilisé les résultats d'un autre pulvérisateur figure IV.3.



Figure IV.3 : Pulvérisette 14 *FRITSCH*. (35)

La chambre de broyage de la pulvérisette 14 utilisée dans ce travail possède un rotor de 24 arêtes ; une grille dont les mailles sont de forme trapézoïdale de 0.5mm de diamètre ; et un récipient collecteur comme le montre la figure IV.4.

Les caractéristiques de ce broyeur en alimentation par électricité sont : 3.8 A ,600 W.



Figure IV.4 : Accessoires de la pulvérisette 14 « chambre de broyage ». (35)

L'opération de tamisage a été réalisé à l'aide de deux tamiseuses l'une « *Retsch* » à système vibratoire présentée sur la figure IV.5 et la deuxième (AS200 control).



Figure IV.5 : Tamiseuse *Retsch*.

La tamiseuse manipulé contient 9 tamis à maille carrées de diamètre décroissants (1.6, 1.25, 1.00, 0.9, 0.8, 0.71, 0.5, 0.355, 0.315) *mm*, plus un fond, elle est menée d'un système de fixation, un couvercle et un moteur pour la vibration. La capacité de cette tamiseuse en fréquence, tension, puissance électrique est 60 *Hz*, 220 *V*, 430*W* respectivement.

Le principe de fonctionnement est déjà présenté dans le chapitre III. Dans l'étude de l'effet de nombre de tamis on a fait recours à une autres tamiseuses de mêmes types contenant des autres tamis de diamètre différents, ces tamiseuses sont présentées sur la figure IV.6.

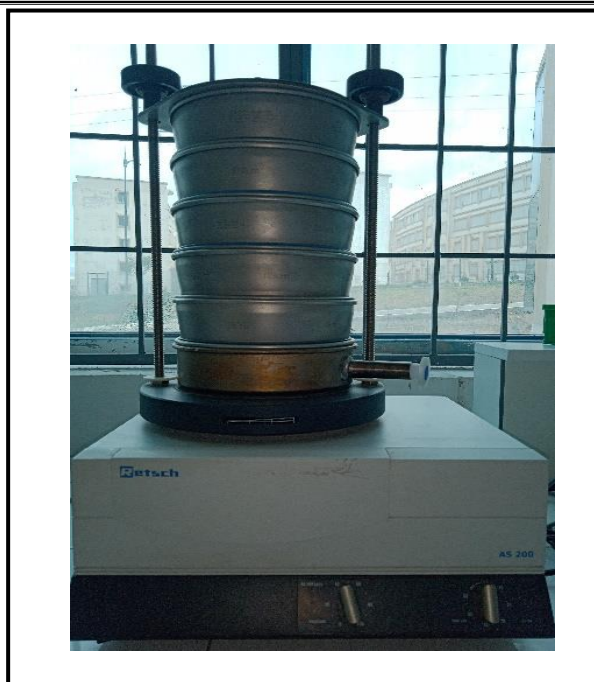


Figure IV.6 : Tamiseuses AS200 control.

La tamiseuse manipulée contient 5 tamis à maille carrées de diamètre décroissants (850, 560, 250, 125, 63) μm , plus un fond.

IV.2.2 Produits utilisés

Plusieurs échantillons solides de natures différentes ont été utilisés dans ce travail ces échantillons sont : principalement le blé pour la comparaison entre les deux types de broyeur et les comprimés (pelliculé (glycophage) et non pelliculé (paracétamol)) pour l'étude de la tamiseuse.

IV.3. Résultats et discussion

IV.3.1 Etude du broyage

La qualité d'une analyse d'un produit ou matériau équivaut en règle générale à celle de préparation d'échantillon qui l'a précédé. Lors du broyage des matières solides et pour une préparation optimale des échantillons, il faut par conséquent respecter divers paramètres : propriétés des matériaux ; importance de la grosseur initiale des morceaux ou grain et du volume d'échantillon ; durée de broyage et finesse final souhaitée.

Partant de ces considérations l'échantillon solides blé a été examiné.

IV.3.1.1 Effet de la quantité à broyer

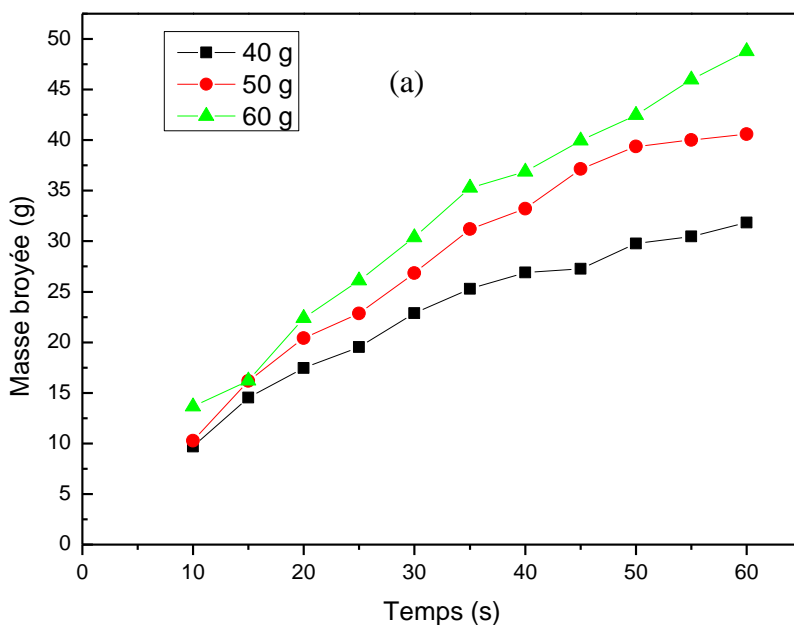
Afin d'étudier l'effet de la quantité à broyer sur le temps de broyage. On a procédé à broyer différentes masses de blé (40, 50, 60) g dans deux types de broyeur (a) dans un mixeur et (b) dans la pulvérisette 14 (35).

Pour réaliser cet effet on a pesé une masse de 40g et broyée pendant 10 s (15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60), puis nous avons traversé par un tamis de 0.71 mm (ce tamis fixe pour tous l'effet de broyage) pour avoir la quantité retenu (masse non broyée) et le tamisât (masse broyée) dans chaque temps.

Les résultats obtenus montrent que plus la masse introduite augmente plus le temps nécessaire pour le broyage totale augmente d'après la figure IV.7 (b).

On peut remarquer que le temps nécessaire pour le broyage varie de 20, 25 et 30 secondes pour des masses croissantes 40,50 et 60 g respectivement. Mais pour la figure IV.7 (a) on remarque que le temps 60 seconde est insuffisant pour broyer la quantité de 40 g de blé.

Les expériences ont montré que le principe du broyage dans la pulvérisette 14 fonctionne mieux que le mixeur quel que soit charge introduite.



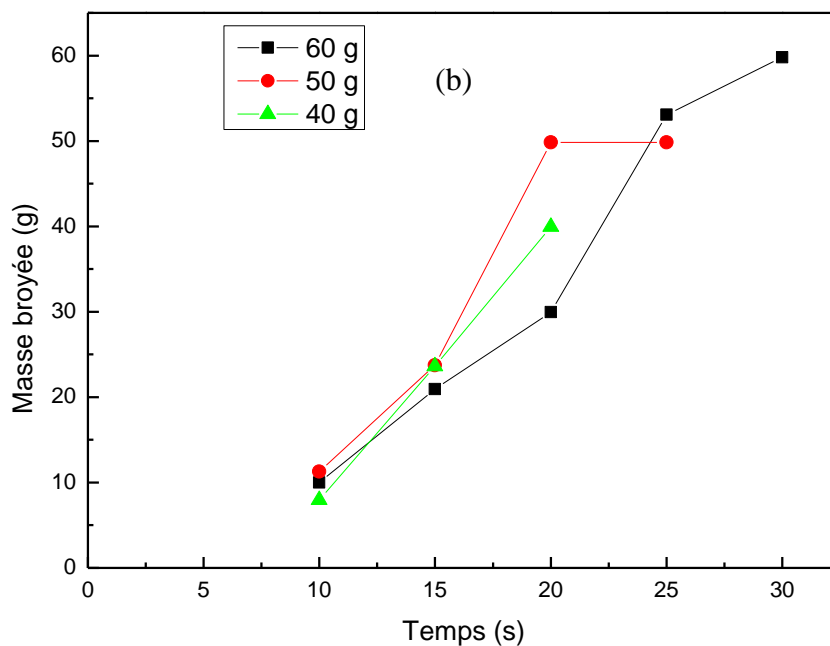


Figure IV.7 : Effet de la quantité à broyer sur le temps de broyage [(a) mixeur et (b) pulvérisette 14 (35)].

IV.3.1.2 Effet du concassage

Le concassage a été effectué en utilisant un mortier. Pour montrer l'effet de cette opération sur le broyage, on a procédé à concasser le blé avant son introduction dans les deux broyeurs, les résultats obtenus ont été comparé avec le broyage du blé sans concassage figure IV.8 (a) et (b).

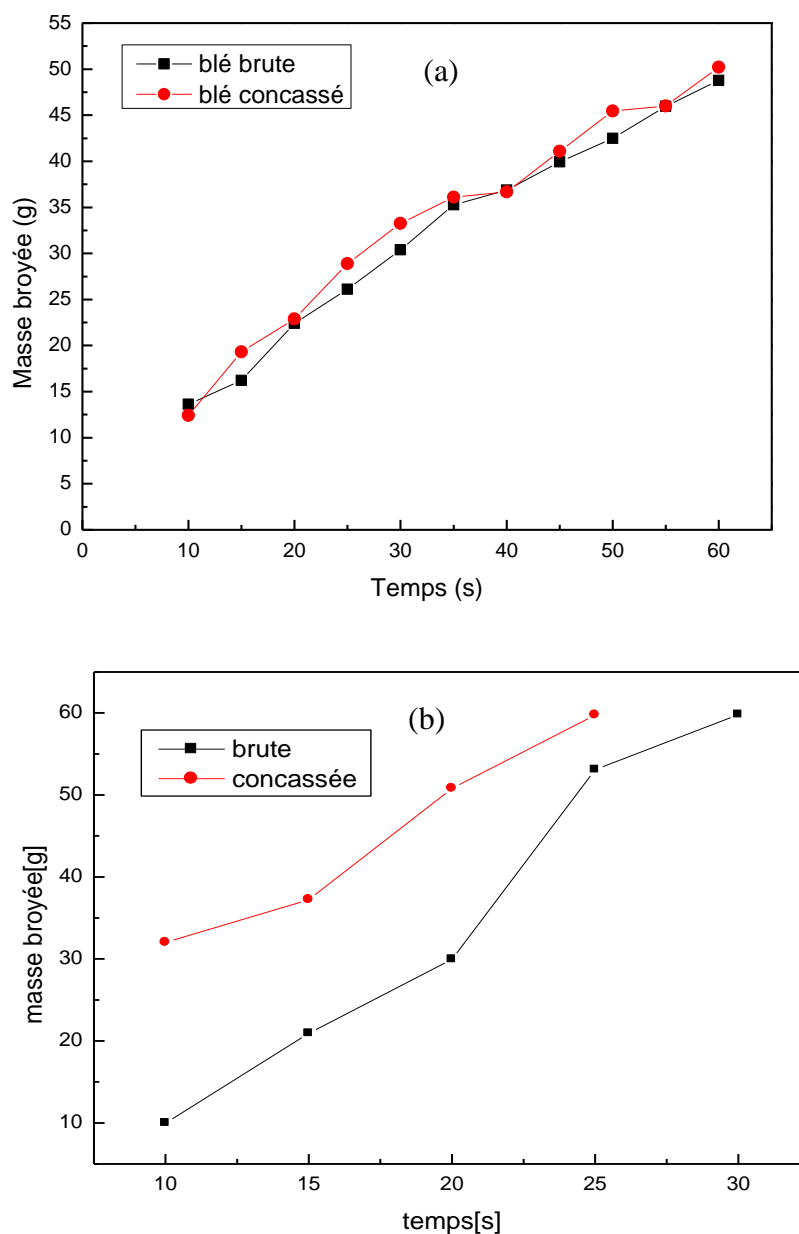


Figure IV.8 : Effet du concassage sur le temps de broyage [(a) mixeur et (b) pulvérisette 14 (35)].

Où on peut constater que le concassage facilite le broyage du blé car on a enregistré un temps de broyage du blé concassé inférieur à celui du blé sans concassage pour une même masse pour la figure IV.8 (b), contrairement la figure IV.8 (a) montre que le concassage n'a aucun effet sur le temps de broyage pour la même masse.

La figure IV.9 montre la comparaison de blé concassé dans les deux types de broyeurs, on constate d'après cette figure que le concassage joue un rôle très important dans la diminution du temps de broyage dans la pulvérisette 14 par contre dans le mixeur n'a aucun rôle.

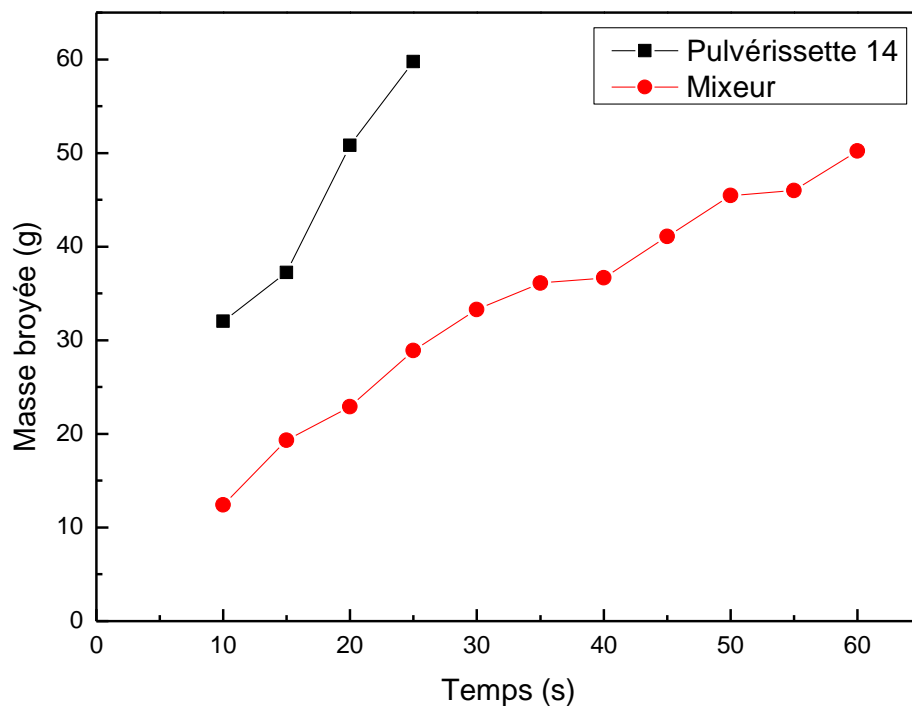


Figure IV.9 : Effet du concassage sur le temps dans les deux broyeurs.

IV.3.1.3 Effet du choix du broyeur

Pour montrer l'effet du choix du broyeur adéquat, on a établi une comparaison entre le broyage des masses varie 40 (a), 50 (b) et 60 g (c) du blé en utilisant le broyeur à rotor est un mixeur. Les résultats obtenus sont montrés sur la figure IV.10.

Où on constate que la masse 40 g du blé a été totalement broyée au bout de (20s) en utilisant la pulvérisette 14 et (60s) insuffisante en utilisant le mixeur.

Cela peut être expliqué par la différence entre le mécanisme de broyage correspondant à chaque appareil qui influe probablement sur le résultat de l'opération de broyage (temps de broyage par exemple) donc on peut conclure que le choix du broyeur adéquat permet d'obtenir des résultats optimales.

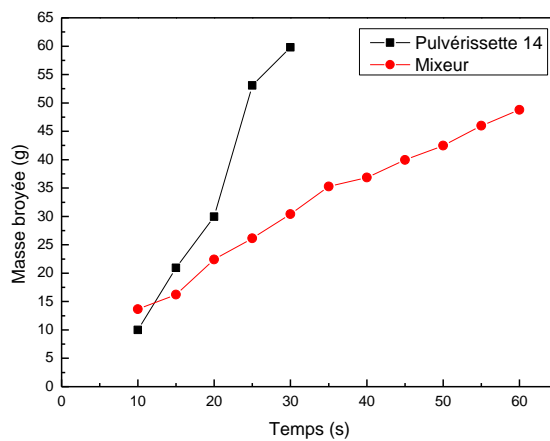
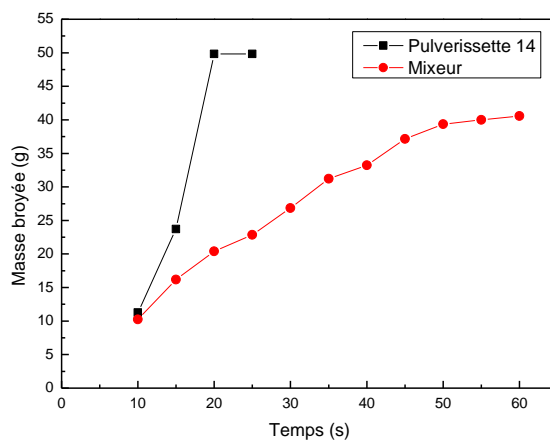
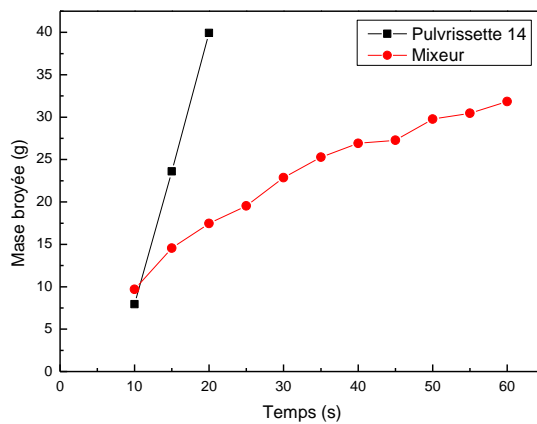


Figure IV.10 : Comparaison entre deux types de broyeurs [(a) 40 g, (b) 50 et (c) 60].

IV.3.2 Etude de tamisage

L'opération de tamisage est l'opération qui permet d'établir une distribution granulométrique des échantillons solides après avoir effectué une répartition de particules sur l'ensemble de tamis en fonction de diamètres des tamis.

Dans cette partie on a choisi d'étudier les effets de paramètres de tamisage tel que la fréquence de tamisage et le temps de tamisage et le nombre de tamis sur la granulométrie. La tamiseuse utilisée dans ce travail est basé sur le mouvement de vibration pour la répartition de l'échantillon solide.

IV.3.2.1 Effet du temps de tamisage

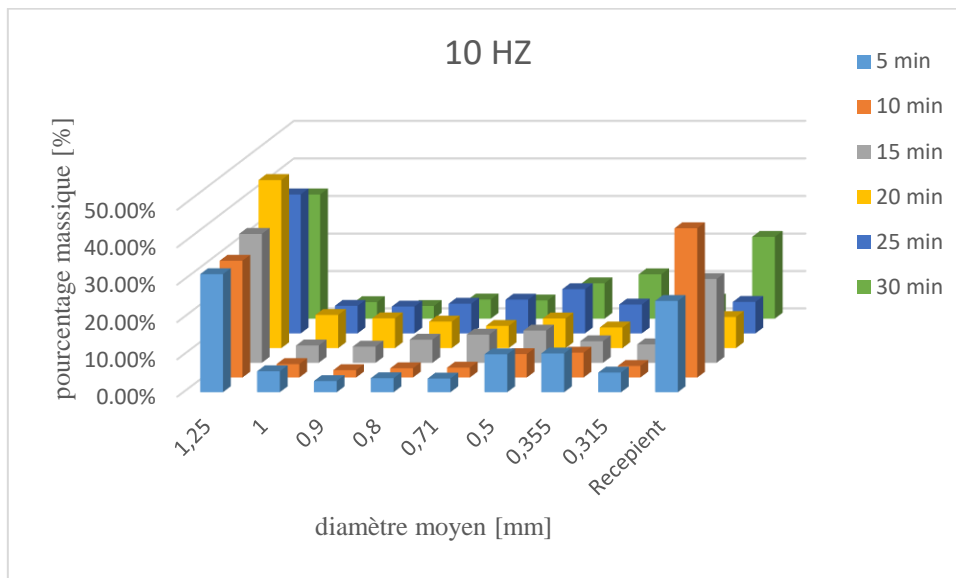
Pour étudier l'effet de ce paramètre on a procédé à varier le temps tout en fixant la fréquence de vibration dans deux types de tamiseuses (*Resch*.et AS200 control). La distribution granulométriques en fréquence massique est représentée sous forme d'histogrammes sur les figure IV.11 et IV.12.

Pour une fréquence 40 *Hz* et un temps variant de (5 à 30) minutes on remarque que les bâtons des histogrammes sont presque superposés figure IV.11 (e) (mêmes masses retenues dans chaque classe).

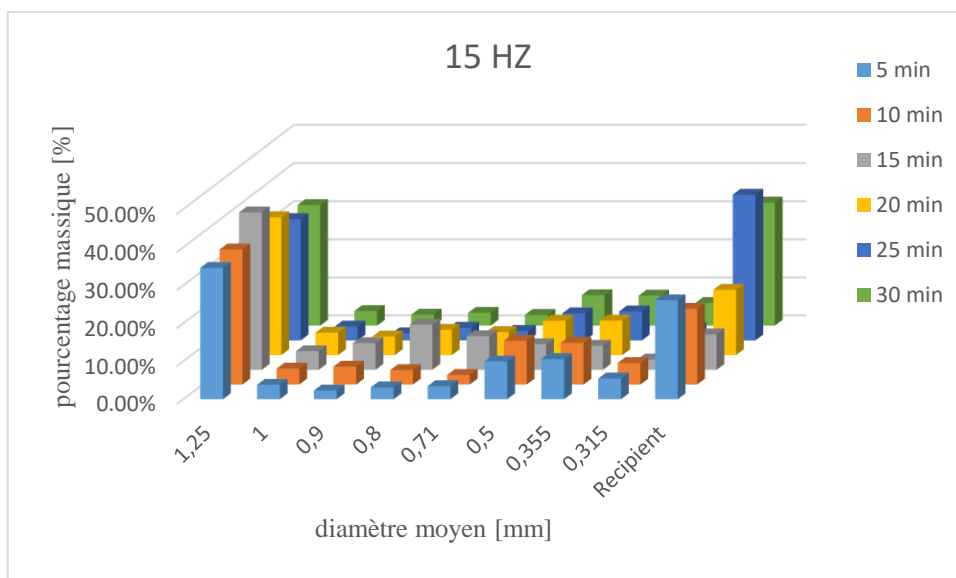
Pour la reproductibilité des résultats on a refait les expériences à différentes fréquences 10, 15, 20, 30 *Hz*. Figures IV.11 (a), (b), (c), (d).

On peut déduire que la fréquence de vibration influe sur la séparation des particules fines plus on augmente la fréquence (vitesse de vibration) plus on recueilli des particules fines aux fond de tamiseuses.

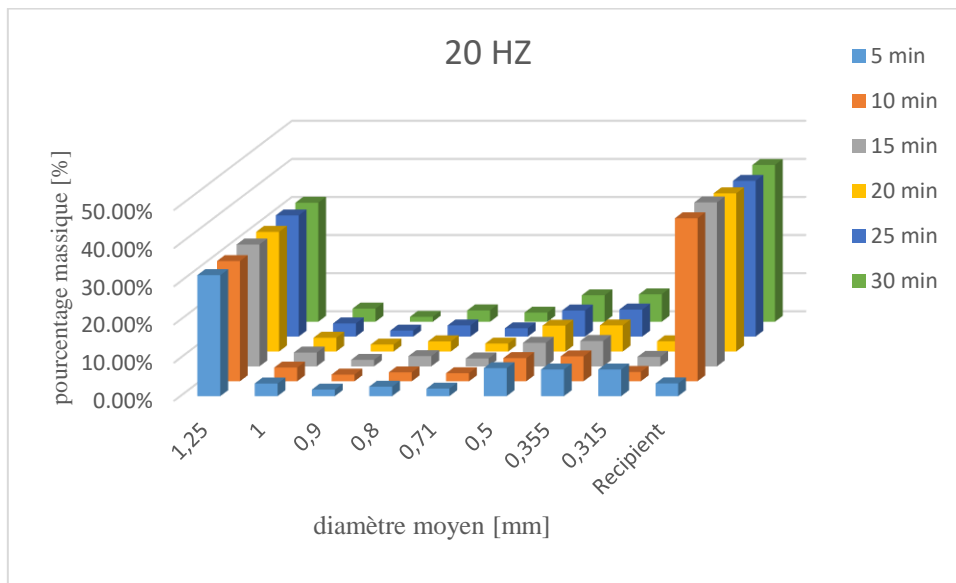
Donc il existe un temps et une fréquence optimale au-delà desquelles la répartition sera invariante (la même distribution) ici (20min, 20 *Hz*).



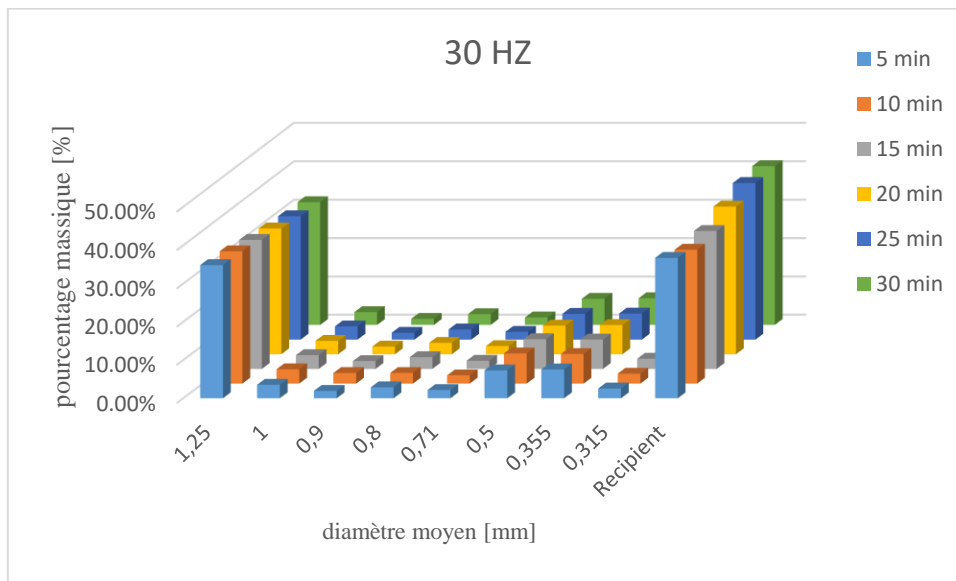
(a)



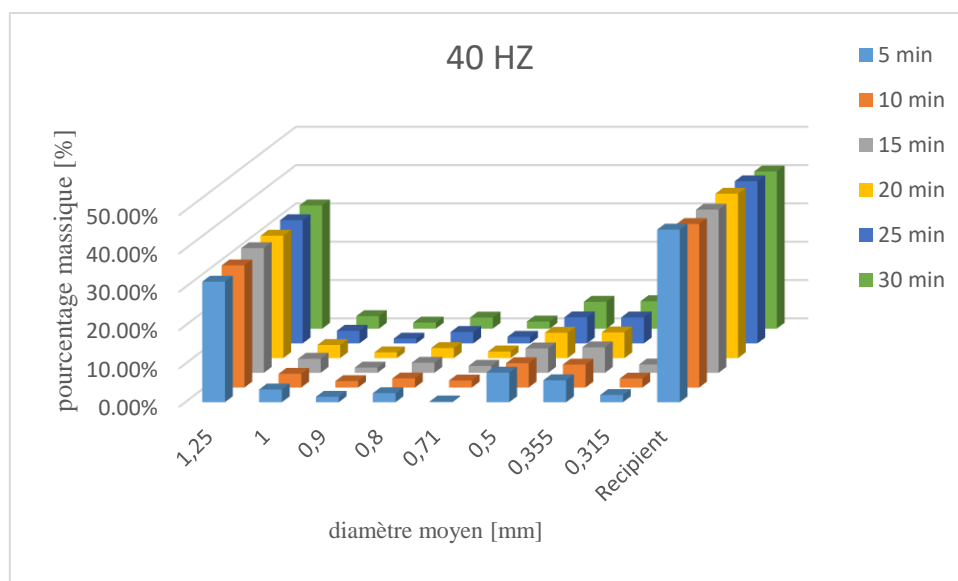
(b)



(c)



(d)



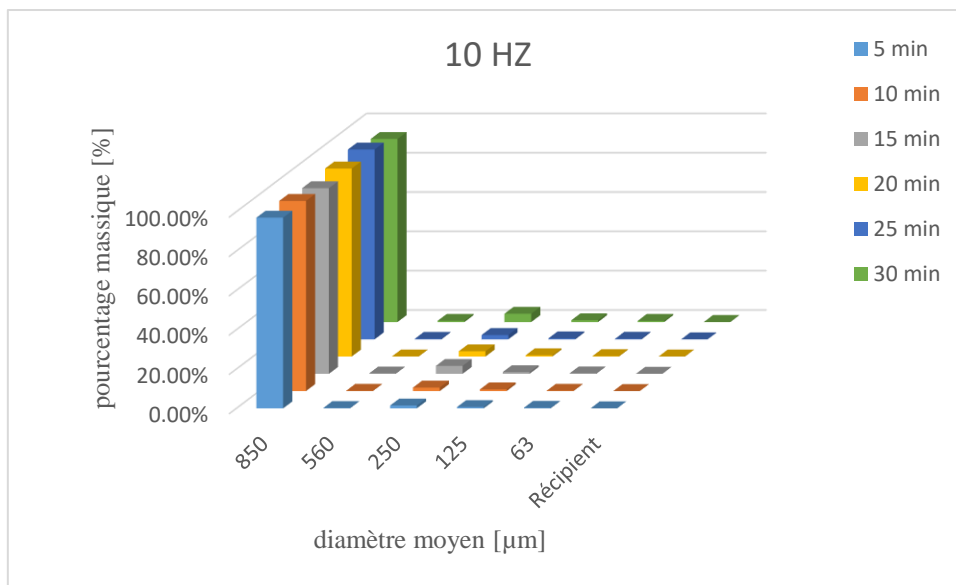
(e)

Figure IV.11 : Effet du temps à différente fréquence du tamisage (*Resch*) [(a)10 Hz, (b) 15, (c) 20, (e) 30 et (d) 40].

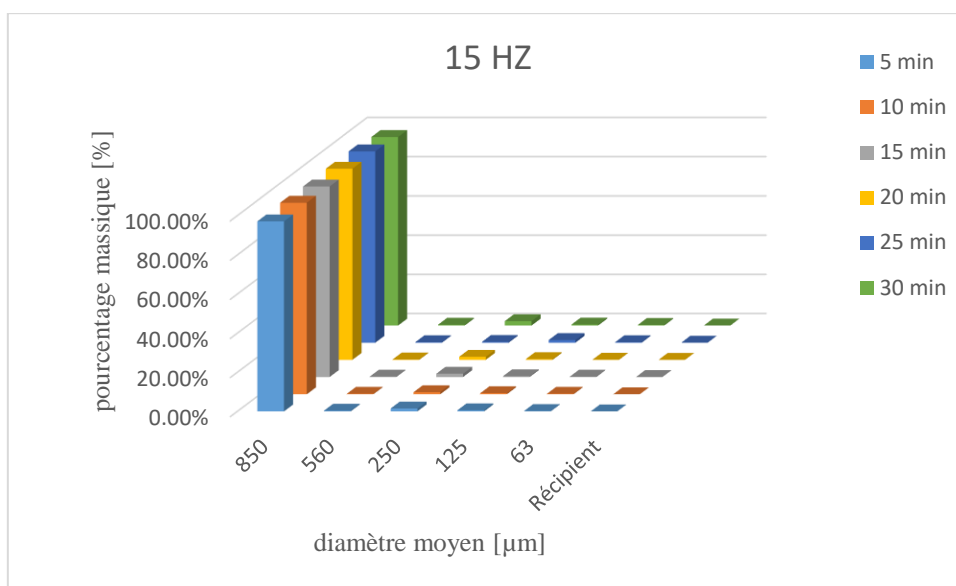
Pour le deuxième type de tamiseuse ; on a gardé les mêmes conditions de travail (le type de médicament, la charge introduite, la variation du temps et la fréquence de la vibration). La seule différence est le diamètre des tamis (μm), ici le nombre des tamis égal à 5 plus un fond.

Pour les fréquences 30 et 40 *Hz* on remarque qu'il y'a une variante des bâtons des histogrammes figure IV.12 (d), (e).

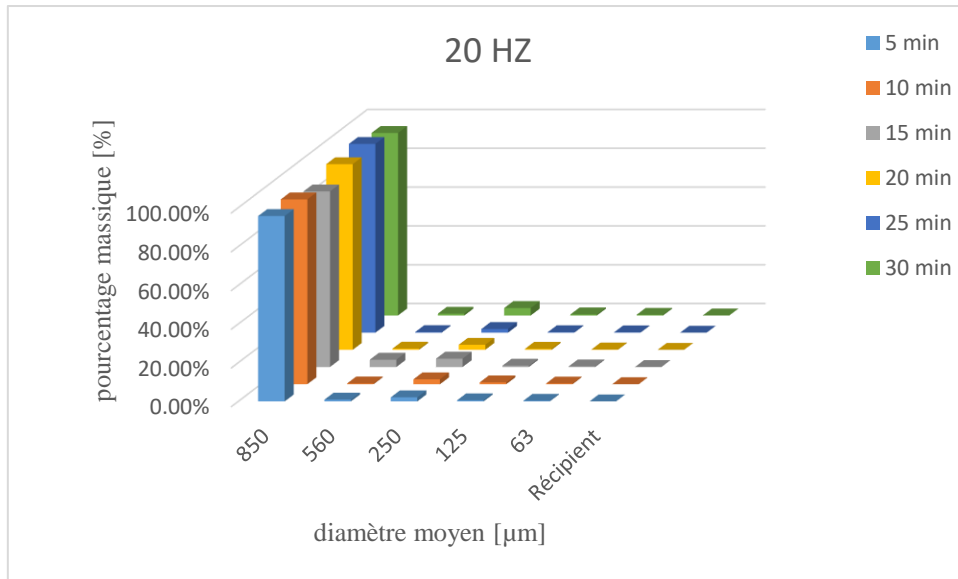
Dans les autres fréquences 10, 15 et 20 *Hz* les bâtons son presque les mêmes. Donc on peut dire que pour les diamètres de tamis en (μm), plus la fréquence de vibration est importante plus les tamis retenus une quantité importante de matière.



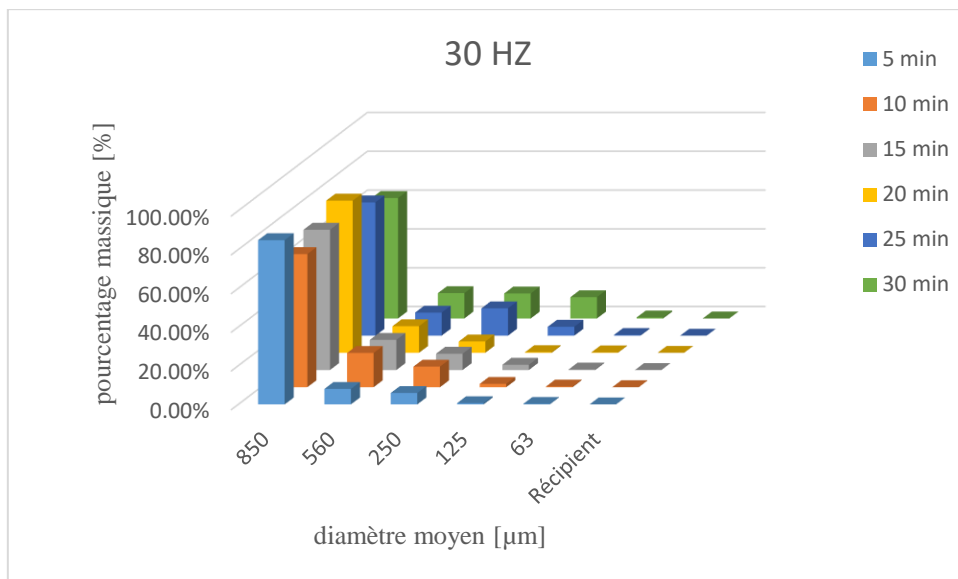
(a)



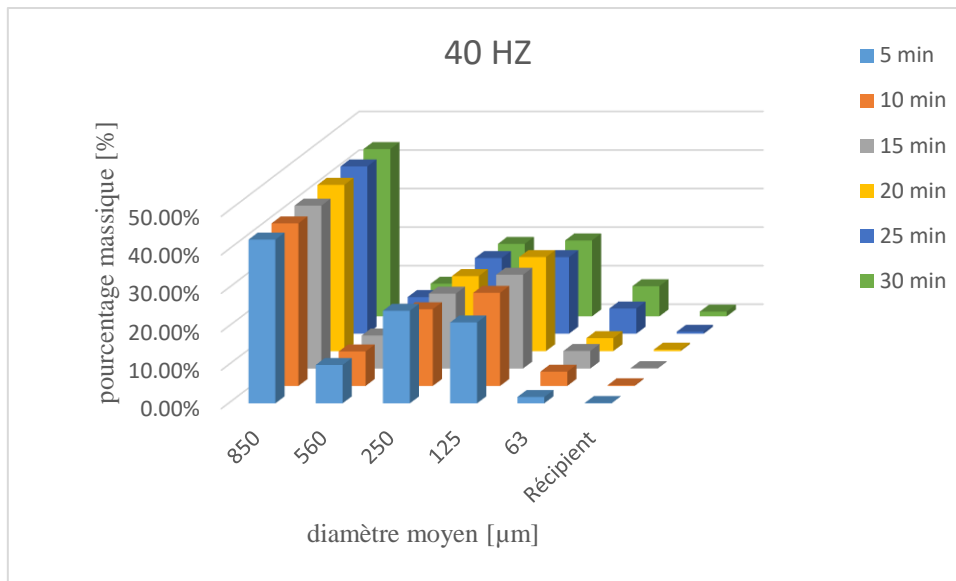
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure IV.12 : Effet du temps à différente fréquence du tamisage (AS200 control) [(a)10 Hz, (b) 15, (c) 20, (e) 30 et (d) 40].

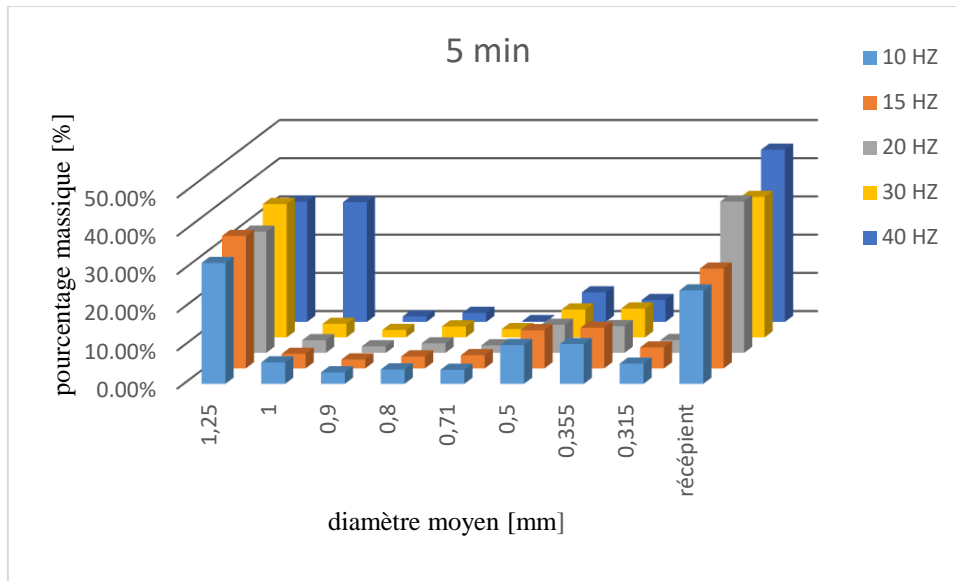
IV.3.2.2 Effet de vibration de tamisage

Dans cette partie, pour étudier l'effet de vibration on a procédé à varier la fréquence de vibration tout en fixant le temps de tamisage dans deux types de tamiseuses (*Resch*.et AS200 control). La distribution granulométriques en fréquence massique est représentée sur les figure IV.13 et IV.14.

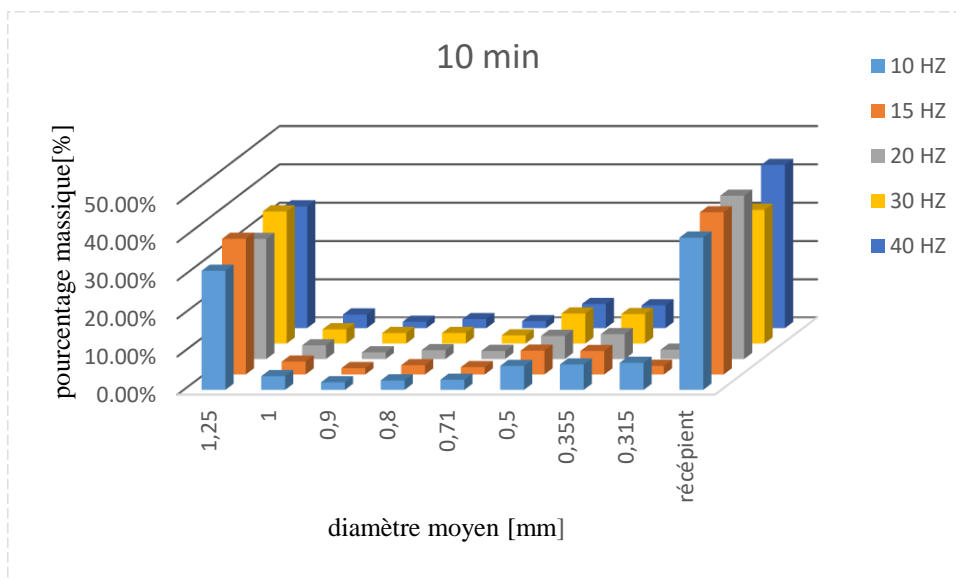
A partir d'un temps de 15 min et une fréquence de vibration variante de (10 à 40) *Hz* on remarque que les bâtons des histogrammes varies figure IV.13 (c) (des masses retenues dans chaque classe).

Pour la reproductibilité des résultats on a refait les expériences à différentes temps 5, 10, 20, 25, 30 min. Figures IV.13 (a), (b), (d), (e), (f).

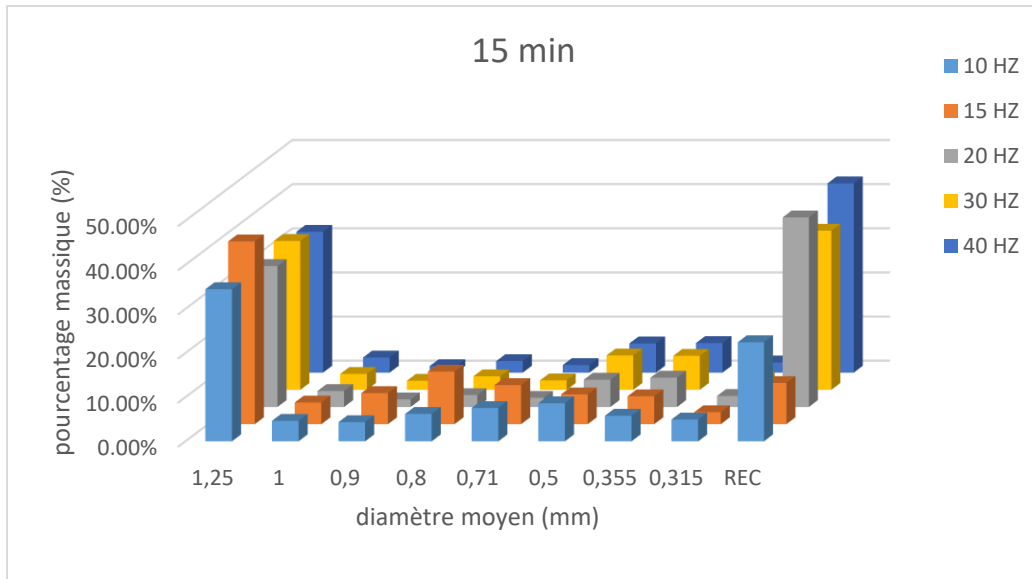
On peut déduire les mêmes remarques sont enregistrées si on fixe le temps et on varie la fréquence. Il existe un temps optimal au-delà desquelles la répartition sera invariante (20 *Hz*).



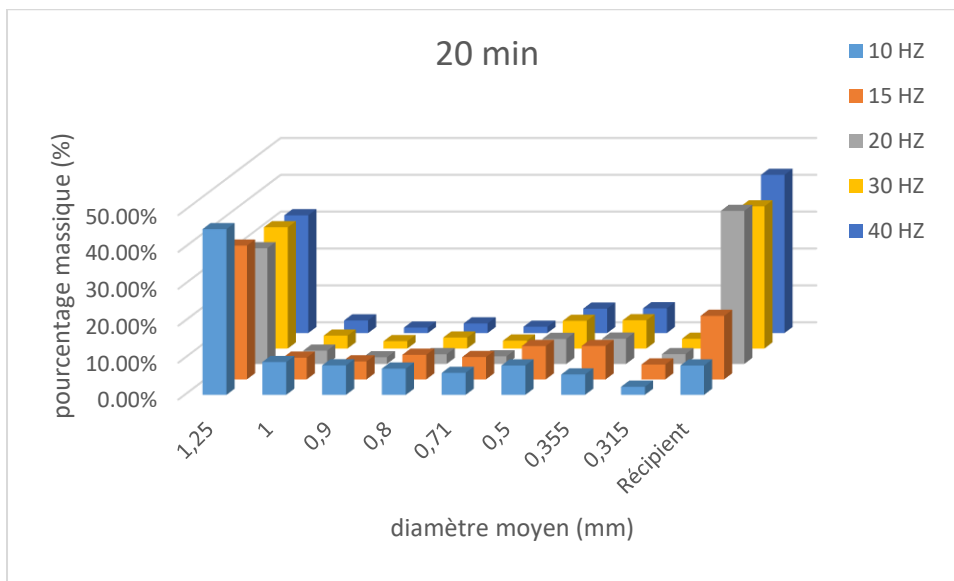
(a)



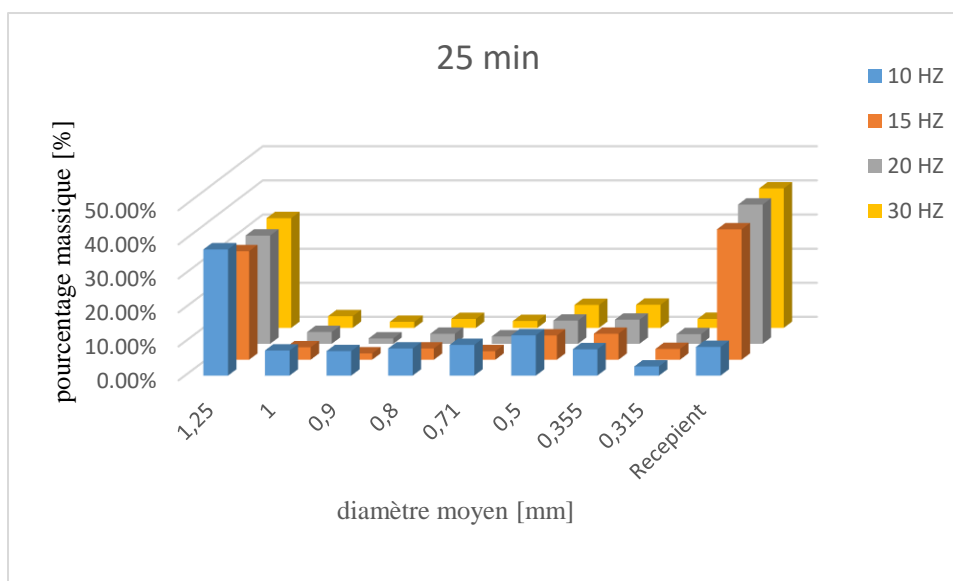
(b)



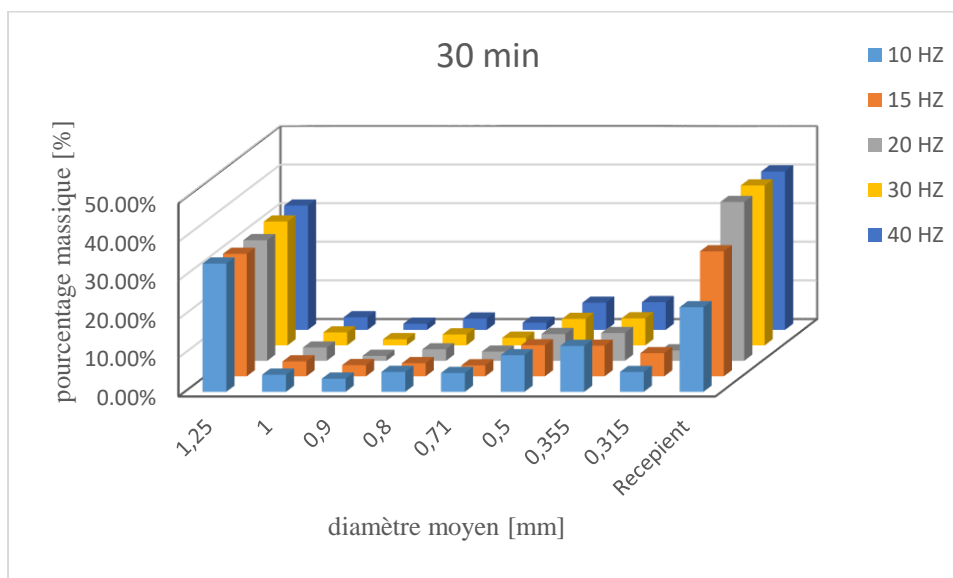
(c)



(d)



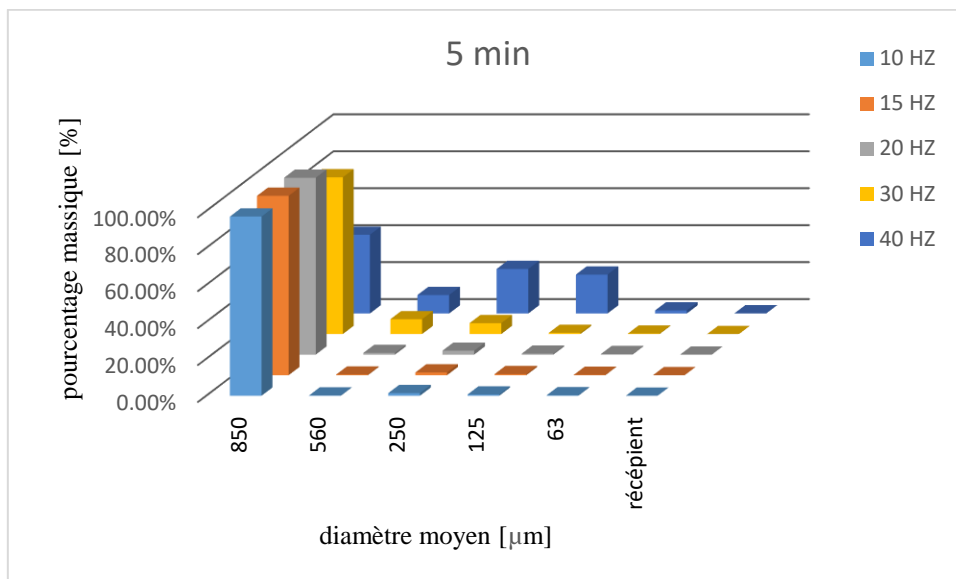
(e)



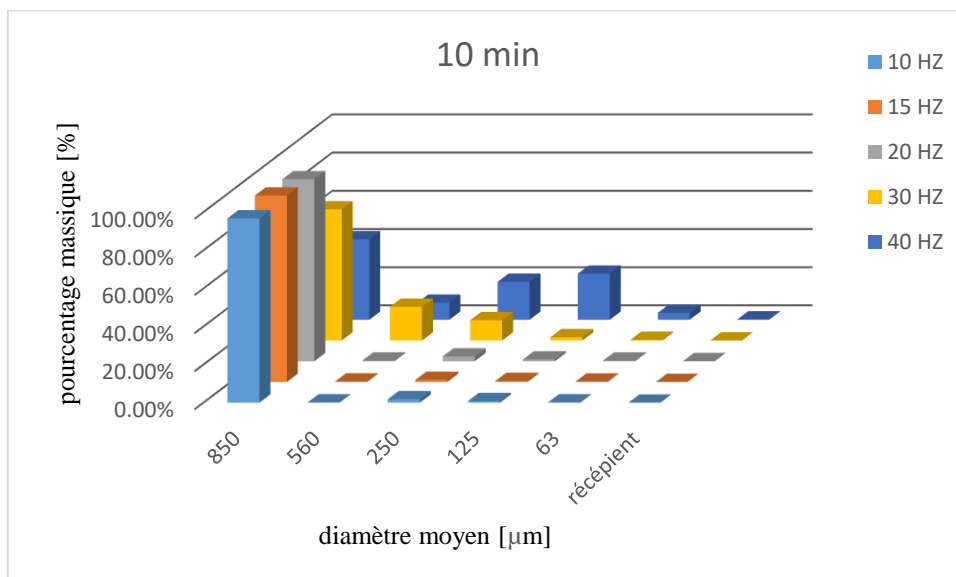
(f)

Figure IV.13 : Effet de vibration à différent temps du tamisage (*Resch*) [(a) 5 min, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 et (f) 30].

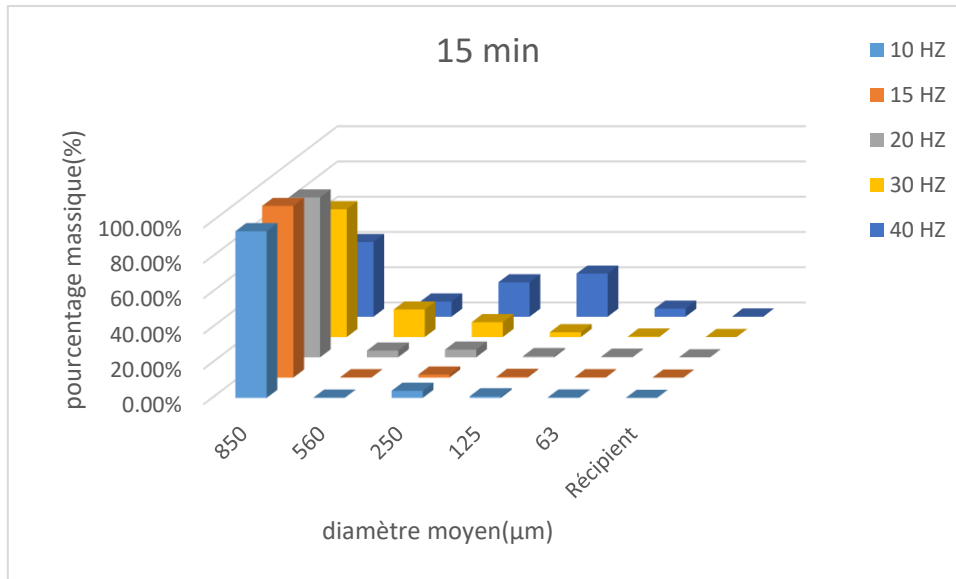
On a refait le même travail dans cette partie avec le deuxième type de tamiseuse. D'après la figure IV.14, la variation du temps n'a aucun effet pour les faibles fréquences de vibration sauf 40 Hz montre une rétention importante dans chaque tamis.



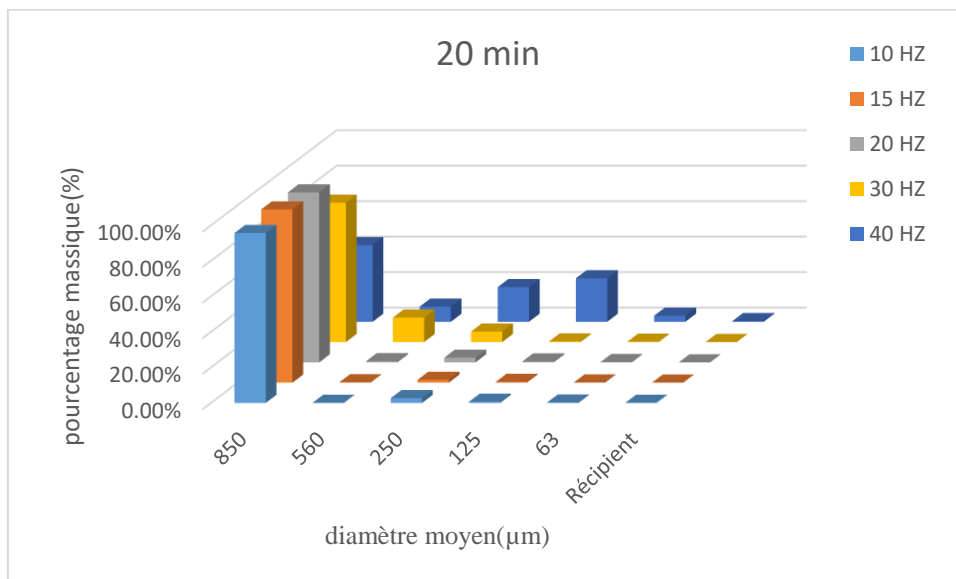
(a)



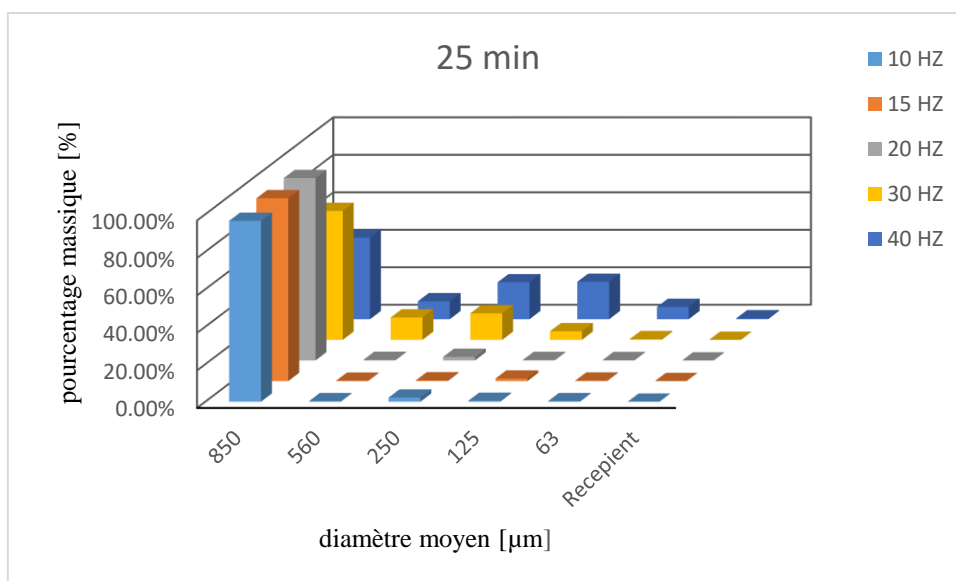
(b)



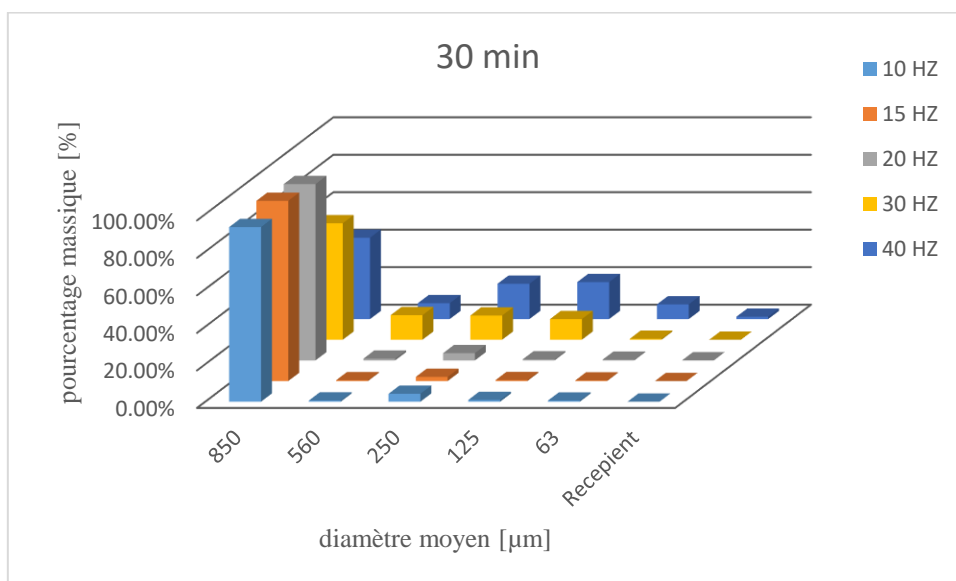
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure IV.14 : Effet de vibration à différents temps du tamisage (AS200 control) [(a) 5 min, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 et (f) 30].

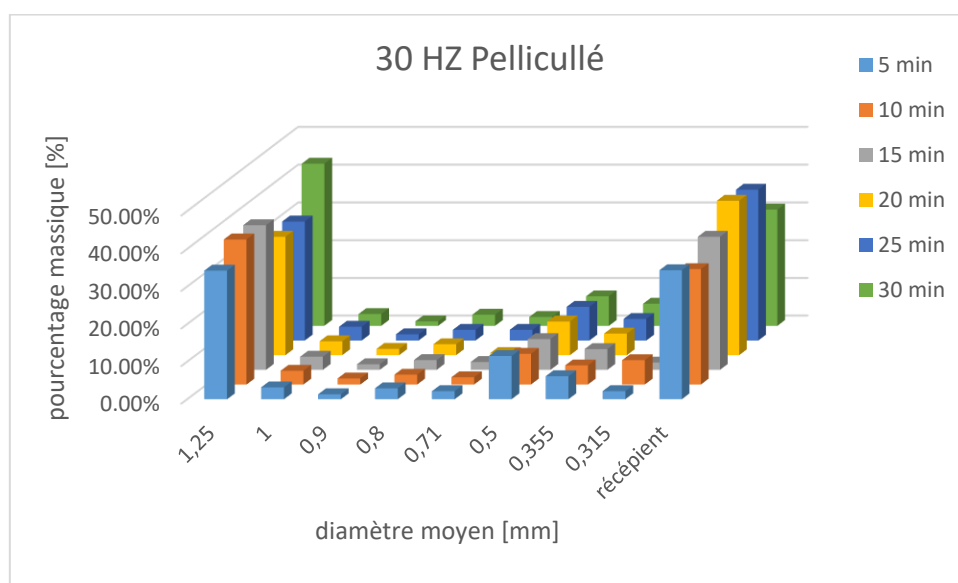
IV.3.2.3 Effet de la nature de médicament sur le tamisage

Dans l'étude de la nature de l'échantillon du solide à tamiser sur l'opération de tamisage on a montré l'effet de cette dernière sur le temps de tamisage pour deux types de tamiseuses (*Retsch*.et AS200 control), car visuellement on peut distinguer une différence entre la granulométrie des échantillons tamisés dans les mêmes conditions. Le tamisage des comprimés

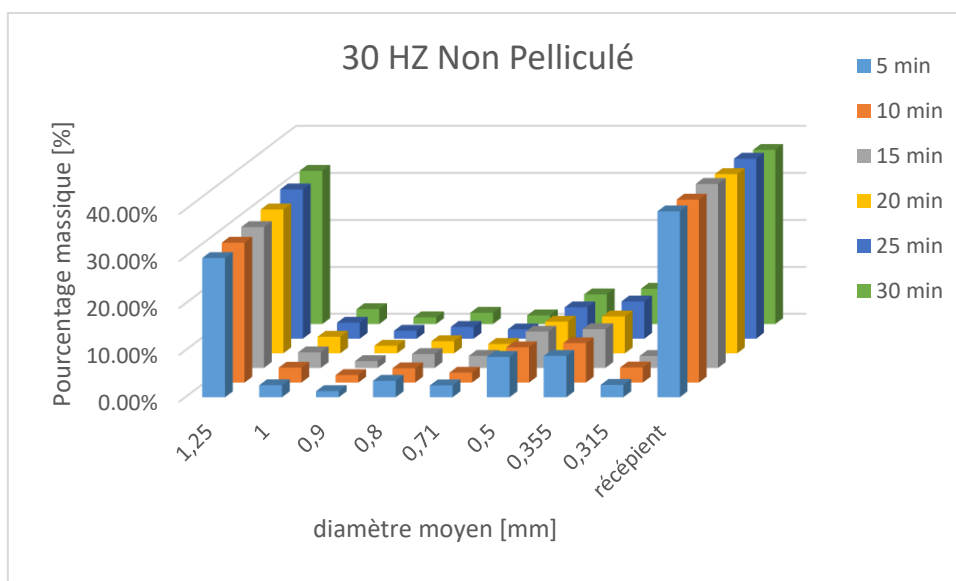
non pelliculé par exemple était très fin par rapport aux autres est les pourcentages des particules au fond du tamis était plus importante figure IV.15 (b) et figure IV.16 (b).

Les courbes issues de cette opération de tamisage sont présentées sur la figure IV.15 et figure IV.16. Donc pas de particules retenues au fond de la tamiseuse AS200 control parce que la fréquence de vibration est faible pour les diamètres en (μm).

Le pelliculage des médicaments joue un rôle dans la distribution granulométrique des poudres, car chaque type de pelliculage sert à un diamètre spécifique. D'après la figure IV.15 (b) le fond de tamiseuse est retenu une quantité importante de poudre car la taille de ce dernier inférieur à 0.315 mm pour le médicament non pelliculé.



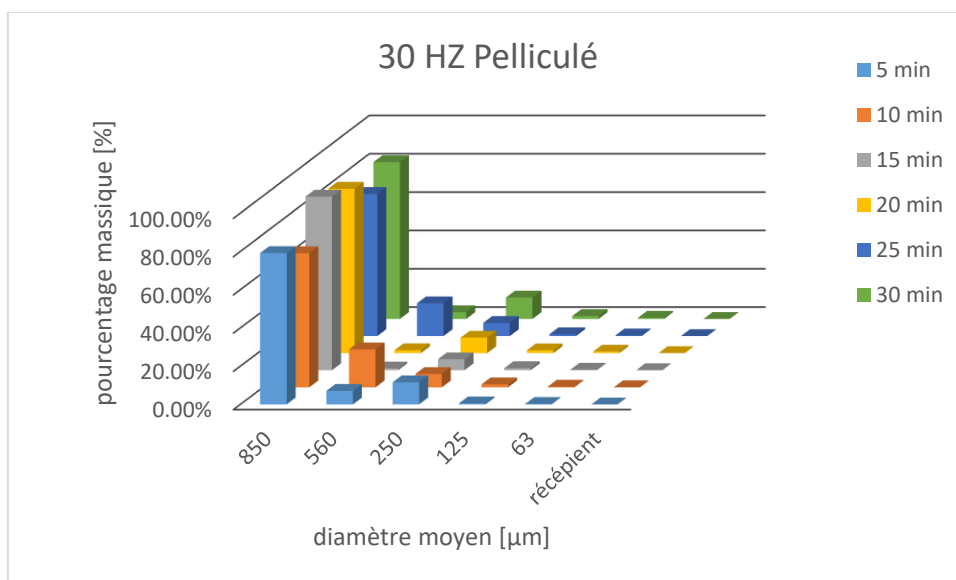
(a)



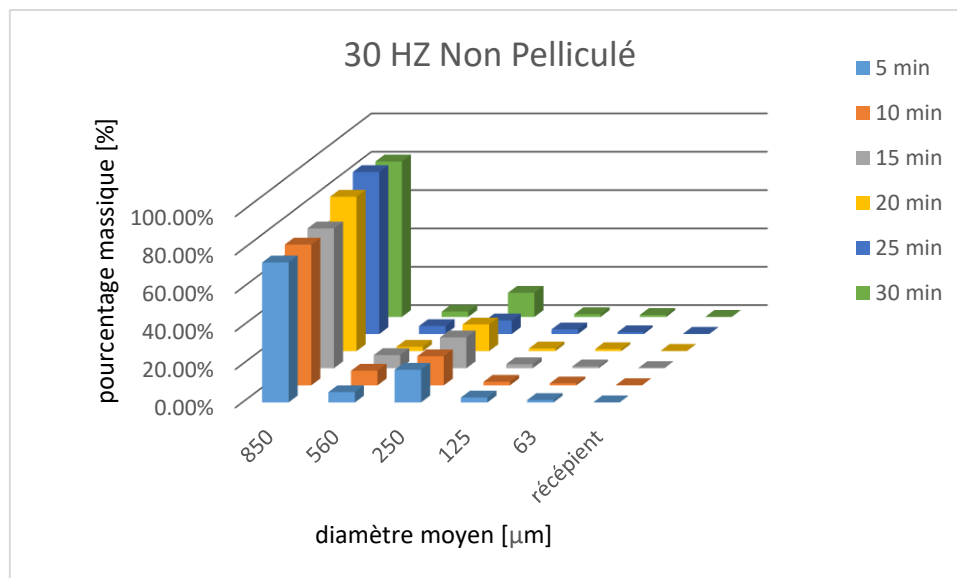
(b)

Figure IV.15 : Effet de pelliculage dans le tamisage (*Resch*) [(a) pelliculé, (b) non pelliculé].

La même chose pour la tamiseuse AS200 control, le tamis numéros 3 (250 µm) retenu une quantité de poudre mieux que pour le médicament pelliculé. Donc on peut constater que la nature de médicament joue un rôle dans la distribution granulométrique, avant chaque opération du tamisage il faut bien choisir les paramètres adéquats pour chaque type de médicament.



(a)



(b)

Figure IV.16 : Effet de pelliculage dans tamisage (AS200 control) [(a) pelliculé, (b) non pelliculé].

IV.3.2.4 Effet du tamisage manuel

D'autre part et afin de montrer l'effet de la vibration mécanique sur la distribution granulométrique on a opté au tamisage manuel. Donc un échantillon solide a été introduit dans le premier tamis et une agitation manuelle de la pile a été appliquée pendant 5 minutes.

Les résultats de l'expérience figure IV.17 et figure IV.18 ont été comparés avec ceux obtenus par le tamisage avec vibration à 10 Hz pendant 5 min.

On remarque une petite différence entre les deux distributions granulométriques correspondantes. Cette différence apparait dans le mode des distributions ainsi que le pourcentage de particules retenues au fond de la tamiseuse où le pourcentage obtenu avec vibration est supérieur à celui obtenu manuellement figure IV.18, Ce qui confirme ce qu'on a déduit précédemment, donc on peut dire que la fréquence du tamisage manuel appliqué est inférieure à 10 Hz.

Pour la figure IV.17 l'effet de vibration apparait dans un diamètre inférieur à 0.71 mm, c'est-à-dire plus le diamètre diminue la vibration est indispensable pour réussir l'opération du tamisage.

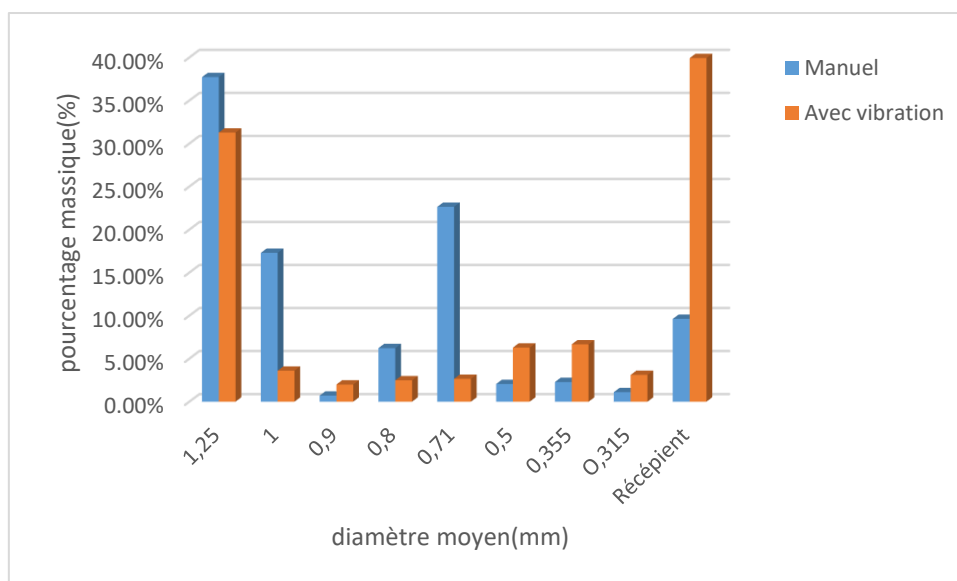


Figure IV.17 : Effet du tamisage manuel. (Resch).

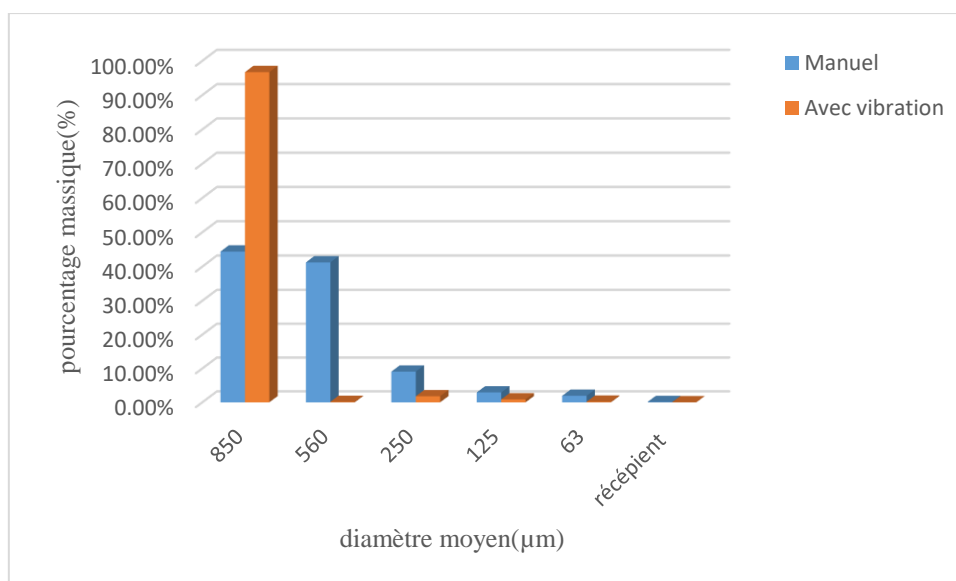


Figure IV.18 : Effet du tamisage manuel. (AS200 control).

CONCLUSION

CONCLUSION

Dans ce travail on a réalisé une étude expérimentale des opérations de tamisage et de broyage de quelques échantillons solides et ce dans le but d'investiguer l'effet de certains paramètres sur ces deux procédés.

L'étude a permis d'exploiter le matériel disponible dans notre laboratoire, assimiler le principe de son fonctionnement d'une part et de montrer l'effet de certains paramètres pour optimiser les deux procédés d'autre part.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de valider les notions théoriques décrivant ces deux opérations.

Donc le but essentiel de ce travail a été atteint, cette étude nous a permis d'appliquer les notions acquises durant notre cursus universitaire dans l'étude des deux opérations industrielles très intéressantes dans l'industrie pharmaceutique en particulier vu notre formation, aussi elle nous a permis de découvrir l'intérêt de la bibliographie : recherche et synthèse et du travail expérimental : manipulation et interprétation.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Guide pratique de ventilation N°17-ED767, « Emploi des matériaux Pulvérulents », INRS, 2004
- [2] Meije_hentsch Carla. Galénique (25: Systèmes pulvérulents) BUSP3 UNIGE. Quizlet
- [3] Allen Terry, « Etude de structure granulométrie », technique d'ingénieur, P1040, 1988
- [4] Melcion.J-P. , « La granulométrie de l'aliment : principe, mesure et obtention », INRA Prod.Anim, 2000, 13, 2, P. 81-97
- [5] Cohen Yves, pharmacie galénique : Bonnes pratiques de fabrication des médicaments,
« Opérations pharmaceutiques : pulvérisation des solide », 8e édition, Masson, Paris 2001, p. 123-136.
- [6] Scher Joël, « rhéologie, texture et texturation des produits Alimentaire », technique d'ingénieur, F3300, 2006
- [7] M-F Devaux ,B Novalés et J-P Melcion, Technologie des pulvérulent dans les Industries agricoles et alimentaires, « caractérisation de la taille des particules », Edition Tec & Doc, Paris
- [8] Afnor, 199087. Recueil des normes française « Granulométrie : tamis, tamisage et autres Méthodes d'analyse granulométrique », 2^{ème} édition, Afnor, Paris, p. 483-567
- [9] Guillaum S, Novalés B, Devaux M-F, AbessisJ, « caractéristiques de Produit granulaires : l'apport de l'analyse d'image pour la mâturation de blé », procédés de Broyage, 1996, 45, 81-86.
- [10] Devaux M-F, Robert P, Melcion J-P, « particule size analysis of bulk powders using mathematical morphology », powder technology, 1997, 90, 141-147
- [11] Bonnabry Pascal, pugnale pierpaolo. médicament_generique.pdf. 6 juin 2018;2-6
- [12] Dr Hamici Abderrzak. les comprimés -cour_.pdf. In Univ-batna2.dz; 2021. p. 2-12.
- [13] Augustin A, Dorvault F. Comprimé.le dictionnaire de l'Académie nationale de pharmacie
- [14] Denise Carrel. Cours8D3Voiesdadministrationdesmédicaments.pdf. 22 mai 2019;1-5.
- [15] saoudi achour.pdf [Internet]. [cité 28 mars 2023]
- [16] Allal S. Cinétique de broyage des matières premières par les broyeurs à boulets (à revêtement en caoutchouc) [Internet] [Thesis]. Université Mohamed Boudiaf - M'sila; 2018 [cité 7 avr 2023]
- [17] cour de broyage génie pharmaceutique master1.pdf
- [18] Mémoire-Nader-Messabihi-2.pdf [Internet]. [cité 29 mars 2023]
- [19] Le Hir† A, Chaumeil JC, Brossard D. Opérations pharmaceutiques. In: Pharmacie galénique [Internet]. Elsevier; 2009 [cité 6 avr 2023]. p. 118-225

- [20] Brochure-broyeur-tamissage-division-Fritsch-fr-Imlab_0.pdf [Internet]. [cité 28 mars 2023].
- [21] Chamayou A, Fages J. Broyage dans les industries agroalimentaires
- [22] SLAMANI mohemd, ELHADI abdelmalek, AMROUNE saleh. Concasseurs et broyeurs : Types et maintenance. Mohamed Boudiaf University of M'sila; 2019.
- [23] Amélioration des caractéristiques techniques d'un broyeur pour les bouteilles en plastique.pdf [Internet]. [cité 7 avr 2023]
- [24] OPERATIONS UNITAIRES_LA_DIVISION.pdf [Internet]. [cité 6 avr 2023].
- [25] Lorleach florence hamon, Harlay Alain, Ridoux, Chansellé serge, Guide de préparateur en pharmacie, « les opérations pharmaceutique : la pulvérisation », 2 ème édition, Masson, 2004, P. 744.
- [26] Blazy pierre, Jdid el-aïd, « Fragmentation, technologie » Technique de l'ingénieur, J3051, 2006.
- [27] Blazy Pierre, Yvon Jacques Et Jdid El- Aïd, Technique de l'ingénieur, « Fragmentation :Généralités. Théorie », A5160, 1
- [28] Allo Olivier, Blanc Pascale, Dalmasse Marie-Ange, Pharmacie galénique BP, « La pulvérisation », 2 ème édition, Porphyre, France, 2005, P. 26-29.
- [29] Aiche Jean-Marc, BeyssacEric, Cardot Jean-Michel, Holfart Valérie, Renoux Robert, Initiation à la connaissance du médicament, « Broyage ou Pulvérisation des solides »,France, 5édition, Masson, 2008, P. 102-103
- [30] J.-P. MELCION, 2000. La granulométrie de l'aliment : principe, mesure et obtention.
- [31] Brochure Haver & Boecker en Allemagne .P27F16207 2000 1.Fe
- [32] Société alpha, <http://www.alpha.be/fr/Tamissage>. Par.ultra_sons_productent.php
- [33] société RETSCH, brochure_Retsch, 99.001.0011/FR,Allemangn,03-2023
- [34] société FRITSH, brochure-FRITSH,99.017.0001/FR,Allemangn,03-2023
- [35] Mémoire etude du broyage et du tamissage des poudres faculté génie des procédés 2010

ANNEXES

Matières solides utilisés dans les expériences

Blé



Le blé est une matière première stratégique qui joue depuis l'origine des civilisations antiques un rôle central pour le développement des sociétés et l'organisation des relations de pouvoir. Le blé est pourtant partout dans le quotidien des consommateurs, y compris en Asie ou en Amérique latine où de nouvelles couches de la population découvrent le pain. Si la demande pour ce produit se mondialise, sa culture en revanche reste localisée dans les territoires qui bénéficient des avantages naturels de la géographie, comme l'eau et des sols fertiles, sans oublier un climat tempéré. Rares sont les pays qui peuvent aujourd'hui à la fois produire du blé et en exporter. Or la demande s'accélère. Elle a doublé entre le début de la décennie 1970 et les années 2010, passant de 330 à environ 700 millions de tonnes. La consommation mondiale de blé devrait dépasser la barre des 900 Mt en 2050.

❖ Caractéristiques du blé

- Riche en fibres ;
- Source de fer ;

- Riche en vitamines du groupe B ;
- Source de vitamine E ;
- Source d'antioxydants.

À la Pharmacopée, sont inscrits l'amidon de blé, l'amidon de maïs, et l'amidon ou fécule de pomme de terre. Ce sont des poudres blanches très fines, insipides et inodores. Insolubles dans l'eau à froid, elles gonflent dans l'eau au-dessus de 80° sans se dissoudre totalement, pour donner une sorte de gelée: l'empois d'amidon.

Comme excipients, on les utilise :

1. sous forme de poudre
 - ✓ pour diluer les principes actifs;
 - ✓ dans la fabrication des comprimés, comme diluant, lubrifiant et délitant;
 - ✓ dans la composition des enveloppes de cachets-
2. et sous forme d'empois
 - ✓ comme excipients pour pommades et
 - ✓ comme liant dans la fabrication des comprimés.

❖ Les comprimés pelliculés



Le nom du produit pharmaceutique <<Glucophage 500mg>>

❖ Composition

- Principes actifs : Metformine chlorhydrate
- Excipients : Noyau : Povidone K30, Magnésium stéarate, Pelliculage : Hypromellose.

❖ **Classe pharma-thérapeutique** : C'est un médicament utilisé pour traiter le diabète. Il appartient à la classe de médicaments appelés les biguanides.

❖ Indications GLUCOPHAGE

Traitement du diabète de type 2, en particulier en cas de surcharge pondérale, lorsque le régime alimentaire et l'exercice physique ne sont pas suffisants pour rétablir l'équilibre glycémique.

- Chez l'adulte, GLUCOPHAGE peut être utilisé en monothérapie ou en association avec d'autres antidiabétiques oraux ou avec l'insuline.
- Chez l'enfant de plus de 10 ans et l'adolescent, GLUCOPHAGE peut être utilisé en monothérapie ou en association avec l'insuline.

❖ **Les comprimés non pelliculés**



Le nom du produit pharmaceutique <<Doliprane 1000mg>>

❖ **Composition**

- Principes actifs : paracétamol
- Les excipients : sont composés de povidone, d'amidon pré-gélatinisé, de carboxyméthylamidon sodique (type A), de talc et de stéarate de magnésium

❖ **Classe pharma-thérapeutique**

Est un médicament oral utilisé comme antalgique et antipyrétique.

❖ **Indications thérapeutiques**

Il est indiqué en cas de douleur et/ou fièvre telles que maux de tête, états grippaux, douleurs dentaires, courbatures, règles douloureuses. Il peut également être prescrit par votre médecin dans les douleurs de l'arthrose. Cette présentation est réservée à l'adulte et à l'enfant de plus de 50 kg (à partir de 15 ans).

Les tableaux des résultats expérimentaux

Broyage

| Temps | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % (60 g) | 22.74 | 27.04 | 37.35 | 43.55 | 50.65 | 58.79 | 61.44 | 66.58 | 70.79 | 76.63 | 81.32 |
| % (50 g) | 20.51 | 32.36 | 40.80 | 45.70 | 53.71 | 62.43 | 66.45 | 74.30 | 78.72 | 80.01 | 81.14 |
| % (40 g) | 24.24 | 36.37 | 43.68 | 48.86 | 57.17 | 63.19 | 67.26 | 68.21 | 74.41 | 76.14 | 79.59 |
| % (60 g) B | 22.74 | 27.04 | 37.35 | 43.55 | 50.65 | 58.79 | 61.44 | 66.58 | 70.79 | 76.63 | 81.32 |
| % (60 g) C | 20.71 | 32.19 | 38.17 | 48.15 | 55.46 | 60.17 | 61.14 | 68.46 | 75.74 | 76.64 | 83.67 |

Tamissage

| Tamis | 1.25 | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.71 | 0.5 | 0.355 | 0.315 | R |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 5 min | 31.62 | 37.24 | 40.24 | 43.99 | 47.65 | 57.81 | 68.20 | 73.48 | 97.92 |
| | 35.57 | 39.76 | 44.47 | 48.27 | 50.79 | 62.32 | 73.30 | 78.96 | 98.90 |
| | 31.70 | 35.01 | 36.73 | 39.21 | 41.18 | 48.52 | 55.51 | 62.50 | 65.84 |
| | 34.88 | 38.42 | 40.35 | 43.23 | 45.39 | 52.68 | 60.23 | 62.79 | 99.54 |
| | 31.46 | 34.79 | 36.21 | 38.57 | 38.77 | 46.50 | 52.23 | 54.12 | 99.16 |
| 10 min | 31.27 | 34.87 | 36.86 | 39.34 | 41.99 | 48.27 | 54.93 | 58.03 | 97.96 |
| | 35.57 | 39.76 | 44.47 | 48.27 | 50.79 | 62.32 | 73.30 | 78.96 | 98.90 |
| | 31.48 | 35.07 | 36.82 | 39.15 | 41.27 | 47.33 | 53.85 | 56.3 | 99.03 |
| | 34.61 | 38.37 | 41.14 | 43.93 | 46.08 | 53.99 | 61.74 | 64.34 | 99.35 |
| | 31.87 | 35.45 | 37.12 | 39.48 | 41.32 | 47.67 | 53.66 | 55.98 | 98.66 |
| 15 min | 34.47 | 39.12 | 43.47 | 49.68 | 57.23 | 65.86 | 71.65 | 76.59 | 99.05 |
| | 41.41 | 46.31 | 53.35 | 65.25 | 74.10 | 80.85 | 87.17 | 89.87 | 99.20 |
| | 31.94 | 35.56 | 37.27 | 39.96 | 42.04 | 48.22 | 54.87 | 57.36 | 100.34 |
| | 33.74 | 37.34 | 39.40 | 42.47 | 44.62 | 52.40 | 60.11 | 62.77 | 98.83 |
| | 32.53 | 36.18 | 37.55 | 40.17 | 41.98 | 48.35 | 54.99 | 57.16 | 99.75 |
| 20 min | 44.86 | 53.74 | 61.72 | 68.83 | 83.66 | 82.73 | 88.25 | 90.44 | 98.79 |
| | 36.24 | 42.13 | 47.01 | 53.68 | 59.73 | 68.77 | 77.84 | 81.86 | 99.07 |
| | 31.35 | 34.96 | 36.78 | 39.43 | 41.51 | 48.29 | 55.13 | 57.81 | 99.29 |
| | 32.87 | 36.37 | 38.37 | 41.35 | 43.49 | 50.99 | 58.64 | 61.30 | 99.85 |
| | 31.93 | 35.36 | 36.85 | 39.47 | 41.19 | 47.81 | 54.52 | 56.83 | 99.73 |
| 25 min | 37.10 | 44.47 | 51.67 | 59.63 | 68.67 | 80.52 | 88.26 | 90.97 | 99.40 |
| | 31.89 | 35.54 | 37.40 | 40.72 | 43.22 | 50.35 | 57.98 | 61.14 | 99.43 |
| | 31.78 | 35.24 | 36.24 | 39.74 | 41.95 | 48.79 | 55.88 | 58.71 | 99.58 |
| | 32.21 | 35.67 | 37.46 | 40.11 | 42.14 | 48.89 | 55.71 | 58.37 | 99.22 |
| | 32.14 | 35.42 | 36.67 | 39.65 | 41.36 | 48.15 | 54.92 | 57.06 | 99.38 |
| 30 min | 33.16 | 37.59 | 41.00 | 46.14 | 51.01 | 60.48 | 72.36 | 77.49 | 99.36 |

| | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 31.68 | 35.53 | 38.44 | 41.83 | 44.68 | 52.71 | 60.62 | 66.61 | 98.94 |
| | 31.21 | 34.65 | 35.94 | 38.91 | 41.29 | 48.22 | 55.41 | 58.12 | 99.24 |
| | 32.03 | 35.37 | 36.96 | 39.78 | 41.74 | 48.58 | 55.56 | 58.11 | 99.512 |
| | 32.16 | 35.42 | 37.00 | 39.90 | 41.75 | 48.74 | 55.91 | 58.38 | 99.40 |