

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**  
Faculté de Technologie  
Institut d'aéronautique et des études spatiales

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*En vue de l'obtention du Diplôme*

### **MASTER EN AERONAUTIQUE**

*Spécialité : Structure Avions*

*Présenté par :*

BOUGUERNIZEN Houssam Eddin

---

## **ETUDE CINÉMATIQUE ET DIMENSIONNEMENT D'UN BROYEUR MECANIQUE POUR MECANOSYNTHESE**

---

*Encadré par : Mr ZIDANE DJILALI*

Blida, décembre 2013

## Résumé :

Une étude a été menée sur un broyeur mécanique qui fonctionne avec une seule bille en acier dur inoxydable, et actionné par un système bielle manivelle en vue de l'élaboration des poudres nanométriques par le procédé de mécanosynthèse. L'influence de certains paramètres de broyage, à savoir: les paramètres géométriques et dynamiques ont une influence sur la variation des forces énergétiques et élastiques créées lors de l'impact de la bille avec la paroi plane à l'intérieur de la jarre du broyeur mécanique, la détermination de ces forces nous permet de connaître du point de vue grandeurs physiques leurs importances particulières dans l'intensité et l'efficacité du broyage qui, généralement est accompagné d'une augmentation de la température dans la jarre. En plus, et au vu des résultats obtenus, nous avons fait un dimensionnement du broyeur mécanique pour différentes variantes et dont la mise en marche est assurée par un moteur électrique.

## المخلص :

أجريت دراسة على طاحن ميكانيكي يعمل بكرة واحدة من الفولاذ الصلب المقاوم للصدأ، يشتغل حسب نظام بيال مانيفال، مخصص لتصميم بودرات نانومترية بواسطة عملية الميكانوسينتينز. العامل الهندسي و الديناميكي للطحن يأترون على تغير القوى الطاقوية و المرنة المولدة اثناء الصدمة بين الكرة و جدار جرة الطاحن، تحديد هذه القوى يسمح لنا بمعرفة أهميتها فيزيائيا على شدة و فعالية الطحن الذي يأتي غالبا مصحوبا بإرتفاع في درجة الحرارة في الجرة. بالإضافة، و حسب النتائج المتحصلة قمنا لمتغيرات عدة بتحجيم الطاحن الميكانيكي الذي يشتغل بمحرك كهربائي.

## Remerciements

Louange à ALLAH le tout puissant qui m'a guidé pour l'accomplissement de ce travail, en me donnant la santé, la force, le courage et le soutien moral. ALLAH merci pour toutes vos faveurs envers moi dans chaque moment de ma vie.

Je tiens à remercier :

Mes parents pour leur soutien moral et financier durant les années d'étude, aucune expression ne serait jamais forte pour leurs exprimer toute ma gratitude, amour et fidélité.

Mr **ZIDANE**, pour m'avoir guidé et informer grâce à ces compétences dans les travaux de recherche, et aussi pour avoir permis d'élaborer ce travail en tant que promoteur.

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents.

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie. A ma fiancée SAMIRA et à mes frères AMEL, WALID ET AMIR. A toute ma famille, et mes amis. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible.

# TABLE DES MATIERES

RESUME .....	1
REMERCIEMENTS .....	3
Deoo.....	4
TABLE DES MATIERES.....	5
INTRODUCTION.....	15
1. ETUDES BIBLIOGRAPHIQUE.....	17
1.1. Introduction .....	18
1.2. Nanomatériaux .....	19
1.3. Les procédés d'élaboration des nanomatériaux.....	24
1.4. Types de broyeurs.....	30
1.5. La nature des équipements de broyage.....	33
1.6. L'application des nanomatériaux.....	33
2. ETUDE CINEMATIQUE DU BROEUR MECANIQUE.....	40
2.1. Introduction.....	41
2.2. Modélisation du broyeur mécanique.....	44
2.3. Vitesse du piston ou de la jarre.....	47
2.4. Accélération du piston ou de la jarre.....	48
2.5. Vitesse de la bille avant son lancement.....	49
2.6. Condition de lancement de la bille.....	50
2.7. Application numérique aux équations de mouvements du système de broyeur.....	56
2.8. Modèle de conception du broyeur mécanique.....	59

3. Aspect énergétique et modélisation en mécanosynthèse.....	61
3.1. Introduction.....	62
3.2. Modélisation du processus de broyage.....	64
3.3. Temps de broyage.....	72
4. Résultats et discussion.....	74
4.1. Introduction.....	75
4.2. Programme de calcul.....	76
4.3. Organigramme de calcul.....	76
4.4. Energie cinétique de la bille.....	78
4.5. Puissance de choc de la bille.....	79
4.6. Force et pression d'impact de la bille.....	81
4.7. Energie et puissance élastiques de choc.....	84
4.8. Dimensionnement du broyeur mécanique.....	87
CONCLUSION GENERALE.....	91

## Liste des figures et tableaux

Figure 1.1 :	Exemples d'objets présents dans la nature dans une échelle de taille en nanomètres.....	19
Figure 1.2 :	Classification des nanostructures selon leur dimensionnalité.....	21
Figure 1.3 :	présentations microscopique des nano-fils.....	22
Figure 1.4 :	nanotétrapodes vus au microscope numérique.....	23
Figure 1.5 :	Distribution de la taille des particules provoquée par la tendance des petites particules à se souder et les grandes particules à se fracturer dans les conditions d'équilibre.....	29
Figure 1.6 :	Schématisation des différents types de broyeur.....	30
Figure 1.7 :	Broyeur attriteur : a) principe de fonctionnement, b) model 1-S.....	31
Figure 1.8 :	Broyeur vibratoire : a) principe de fonctionnement, b) modèle SPEX 8000.....	32
Figure 1.9 :	Broyeur planétaire : a) modèle PM400.principe de fonctionnement, b) principe de fonctionnement.....	33
Figure 1.10 :	représentation d'un model d'avion.....	34
Figure 1.11 :	l'intérieure d'un avion « structure interne ».....	36
Figure 1.12 :	Revêtement nano structuré.....	37
Figure 1.13 :	l'application des nanomatériaux dans les Moteurs d'aéronefs.....	38
Figure 1.14 :	l'utilisation de nanomatériaux dans l'intérieur d'avion.....	39
Figure 2.1 :	Principe de fonctionnement d'une Bielle manivelle .....	42
Figure 2.2 :	Schéma du système d'agitation.....	43
Figure 2.3 :	Modélisation à un système bille-manivelle.....	45
Figure 2.4 :	La course du piston en fonction de l'angle de rotation de la manivelle à la vitesse de rotation, $\omega_m = 900$ tr/min.....	47
Figure 2.5 :	La vitesse du piston en fonction de l'angle de rotation de la manivelle à la vitesse de rotation, $\omega_m = 900$ tr/min. ....	48
Figure 2.6 :	L'accélération du piston en fonction de l'angle de rotation de la manivelle à la vitesse de rotation, $\omega_m = 900$ tr/min.....	49
Figure 2.7:	Trajectoire du mouvement de la jarre et de la bille.....	50



Figure 2.8 :	Déplacement de la jarre et de la bille en fonction du temps à la vitesse de rotation 900 tr/min.....	58
Figure 2.9:	Déplacement de la jarre et de la bille en fonction du temps à la vitesse de rotation 1050 tr/min.....	59
Figure 2.10 :	Schéma d'un broyeur mécanique de système bielle-manivelle.....	60
Figure 3.1 :	le rapport de rebondissement de la bille $\eta_b$ en fonction.....	63
Figure 3.2 :	Forces exercées lors du choc mécanique des billes (a) force de collision normale et (b) force de cisaillement.....	66
Figure 3.3 :	La surface de contact d'impact des billes de broyage.....	66
Figure 3.4 :	Représentation schématique de la prise de la poudre compacte entre la bille et la paroi pendant la collision.....	69
Figure 3.5:	Une géométrie de collision à la compression maximale de la bille avec la surface plane.....	70
Figure 4.1:	Schéma de calcul des forces énergétiques et plastiques à l'intérieur de la jarre du broyeur mécanique de système bielle-manivelle.....	77
Figure 4.2:	Energie cinétique de la bille et sa vitesse en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille, $d=30$ ; 40 et 50 mm.....	79
Figure 4.3:	Puissance de choc de la bille et sa fréquence en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille, $d=30$ ; 40 et 50 mm.....	80
Figure 4.4:	Temps de lancement de la bille et sa hauteur atteinte dans la jarre en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle.....	81
Figure 4.5:	Rayon de contact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille, $d=30$ ; 40 et 50 mm.....	82
Figure 4.6:	Surface de contact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille, $d=30$ ; 40 et 50 mm.....	83
Figure 4.7:	Force et pression d'impact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille, $d=30$ ; 40 et 50 mm.....	84
Figure 4.8:	Déformation verticale produite par la bille lors de l'impact avec la surface plane en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle et pour des diamètres de la bille, $d=30$ ; 40 et 50 mm.....	85

Figure 4.9:	Energie élastique d'impact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille, $d=30$ ; 40 et 50 mm.....	86
Figure 4.10:	Puissance élastique d'impact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille, $d=30$ ; 40 et 50 mm.....	87
Figure 4.11 :	Schema d'un broyeur mécanique à système bielle-manivelle.....	90
Tableau 2.1 :	Paramètres géométriques et dynamiques du broyage.....	46
Tableau 2.2 :	Applications numériques aux équations du mouvement du modèle de broyeur pour deux vitesses de rotation, $\omega_m=900$ et 1050 tr/min.....	57
Tableau 3.1 :	Constantes géométriques pour différentes configurations de broyage, pour les surfaces courbées avec un rayon de courbure négatif $-R_j$ , $\chi$ est défini comme $-R_j/R_b$ [21].....	68
Tableau 3.2:	Caractéristiques des contacts Hertiens pour différents broyeurs.....	71
Tableau 4.1:	Valeurs dimensionnelles du broyeur mécanique de système bielle-manivelle.....	89

## Liste des symboles

- OB : C'est la « manivelle » de rayon  $r_m$ , elle est entraînée par la vitesse angulaire  $\omega$  ;
- AB : représente la « bielle » de longueur  $l_b$ , tel que A est appelé *pied de bielle* et B est appelé *tête de bielle* ;
- pmh : Le Point Mort Haut ;
- pmb : Le Point Mort Bas.
- $r_v$  : Le rayon de la manivelle
- $l_b$  : La longueur de la bielle ;
- $\omega_m$  : La vitesse angulaire de la manivelle ;
- $\theta$  : L'angle de rotation de la manivelle ;
- $S_p$  : La course du piston ou l'amplitude du mouvement de la jarre
- $g$  : Accélération de la pesanteur,  $m/s^2$
- $t_1$  : Temps initial de lancement de la bille
- $k_0$  : Constante qui dépend des caractéristiques de la poudre, de la vitesse relative de la bille et le matériau caractérisant la dureté
- $t_{chute}$  : Temps de chute de la bille après qu'elle atteint une hauteur maximale dans la jarre, dans le cas général, considéré égal au temps  $t_{pic}$
- $E_b$  : L'énergie cinétique de la bille
- $F_n$  : la force normale
- $F_t$  : la force tangentielle
- HR : le rayon d'Hertz
- MC : le traitement mécano-chimique
- $(\tau)$  : le temps d'impact
- $(r_h)$  : le rayon de la surface d'impact
- $(h_0)$  : l'épaisseur de la poudre compacte supposée un disque
- $(P_n)$  : la pression d'impact normal
- $(F_n)$  : la force normale d'impact
- $v_b$  : Vitesse de choc de la bille ;
- $\rho_b$  : Masse volumique de la bille ;
- $E$  : Module d'Young de la bille ;

- $r_h$  : Rayon de la surface d'impact ;
- $R_b$  : Rayon de la bille ;
- $D_j$  : Diamètre de la jarre;
- $h_j$  : Hauteur de la jarre ;
- $n_b$  : Nombre de billes ;
- $\rho_p$  : Masse volumique de la poudre ;
- $C_R$  : Rapport de la masse des billes sur la masse de poudre.
- $g_\tau$ ,  $g_r$ , et  $g_p$  : Sont des coefficients qui dépendent de la géométrie de collision
- $k$  : Une constante
- $D = 2r_0$  : Diamètre de la poudre compacte, m.
- $f$  : C'est la fréquence de choc de la bille.
- $\varepsilon$  : Contrainte de déformation
- $\lambda$  : Distance entre la première et la deuxième collision ;
- $v_b$  : Vitesse de collision de la bille.
- $l_c$  : La longueur du cylindre;
- $cch_j$  : La hauteur de la jarre;
- $\varnothing_c$  : Le diamètre du cylindre;
- $\varnothing_b$  : Le diamètre de la bille;
- $S$  : La course du piston

## REFERENCES

- [1] Agence nationale de sécurité du médicaments et de produit de santés  
Ansm :<http://ansm.sante.fr>
- [2] Lexique :le dictionnaire multimédia des mots de science :[www.universcience.f](http://www.universcience.f)
- [3] Thèse doctorat : Université du MaineSpécialité :Physique des Matériaux et des Surfaces Par Moussa GRAFOUTE : ETUDE DES PROPRIETES STRUCTURALES ET MODELISATIONS DE POUDRES NANOSTRUCTUREES DEFER OBTENUES PAR BROYAGE MECANIQUE le 07 Octobre 2004
- [ a°] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_bielle-manivelle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_bielle-manivelle)
- [ b°] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Usure>
- [4] « L'avenir des nanotechnologies », compte rendu de conférence d'Étienne Klein à l'Institut Diderot, le 12 janvier 2010
- [5] Zhang H, Liu G L and Qi K Z 2010 Chin. Phys. B 19 048601
- [6] Nanométries (Cao, 2004, p.12 ; AFSSET, 2006, p.18),
- [7] K. Akkouche, mémoire de magistère, Université de Boumerdes, 2010
- [8] C. Suryanarayana, Progr. Mater. Sci. 46 (2001) 1.
- [9] S. Lamrani, N. Maddache, mémoire d'ingénieur, Université de tizi Ouzou, 2008.
- [10] M. Lahlou-Mimi, J.M. Grenèche (1995), J.M.M.M. 150, p 263
- [11] J.M. Grenèche, J.M.D. Coey, (1990), J. Phys. 51, p 231

- [12] Nanomaterials in Aerospace Applications, Tony McNally PhD. School of Mechanical
- [13] P. Bellon & G. Martin, Sol. Stat. Phen. Vol. 3&4, pp. 109-124, 1988
- [14] Nanomaterials for Aviation Industry: [nanomaterials%20for%20aviation.pdf](#)
- [15] Z. S. Budin, I. P. Almanar, S. Kamaruddin, N. C. Maideen, and A. H. Zulkiflia, « Modeling of vial and ball motions for an effective mechanical milling process ». Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, pp.4312-4319, 2009.
- [16] M. Riffel and J.Schilz, « Mechanical alloying of Mg<sub>2</sub>Si », *Ascripta Metallurgica and Materialia*, vol. 32, N°12, pp.1951-1956, 1995.
- [17] H.Dutta and S.K. Pradhan, « Microstructure characterization of high energy Ball milled nanocrystalline V<sub>2</sub>O<sub>2</sub> by Rietveld analysis », *Materials Chemistry and Physics*, vol.77, pp.868-877, 2002.
- [18] L.Li and O.L.Man, « Mechanical alloying », Kluwer Academic Publisher, pp.243, Boston, 1998.
- [19] M. Magini, *Mat.Sci.Forum*, 88-90, 121 (1992).
- [20] Maurice D R and Courtney T H 1990 *Metall. Mater.Trans. A* 21 289
- [21] Lu Sheng-Yong, Mao Qiong-Jing, Peng Zheng, Li Xiao-Dong, and Yan Jian-Hua
- [22] Maurice D R and Courtney T H 1990 *Metall. Mater.Trans. A* 21 289
- [23] C. Suryanarayana, « Mechanical alloying and milling », *Progress in Materials Science*, volume 46, pp.1-184, 2001.
- [24] D.A porter and K.E Easter ling, « phase transformation in Metals and Alloys»,
- [25] J. R. HARRIS, J. A. D. WATTIS and J. V. WOOD, « A comparison of different models for mechanical alloying », *Acta materialia*, volume 6, pp.6491-6503, 200.
- [26] D.R. Maurice and T.H. Courtney, *Met.Trans.*, 21A, 289 (1990).
- [27] C. Suryanarayana, « Mechanical alloying and milling », *Progress in Materials Science*, vol. 46, pp.1-184, 2001.[28]M. Abdellaoui and E. Gaffet, « A mathematical and experimental dynamical phase diagram for ball-milled Ni<sub>10</sub>Zr<sub>7</sub> », *Journal of Computational Physics*, volume 209, pp.351-361, 1994

[28] M. Abdellaoui and E. Gaffet, « A mathematical and experimental dynamical phase diagram for ball-milled Ni<sub>10</sub>Zr<sub>7</sub> », Journal of Computational Physics, volume 209, pp.351-361, 1994.

[29] ELECTRO-INDUSTRIES située à *Azazga* (W Tizi Ouzou Algérie) commercialisation des moteurs *électriques*, alternateurs, transformateurs

# **Introduction générale**

Le développement des nanotechnologies recèle un potentiel considérable d'avancées des connaissances et de transformations positives dans notre vie quotidienne: nouveaux outils de diagnostic médical, médicaments mieux ciblés, notamment pour combattre les tumeurs cancéreuses ou d'autres maladies graves telles le Sida, saut technologique porteur de percées nouvelles dans les technologies de l'information et de la communication, matériaux à la fois plus solides, plus résistants et mieux formables ou déformables, ouverture à des progrès substantiels dans le domaine des économies d'énergie et des énergies nouvelles qui conditionneront notre futur, etc., sont quelques exemples des bienfaits qu'elles peuvent apporter.

D'ores et déjà, des produits issus des nanotechnologies commencent à peupler notre présent : textiles antitaches ou à imperméabilité renforcée, crèmes solaires particulièrement protectrices, huiles anti-cholestérols, vitres hydrophobes autonettoyantes, etc., la liste, déjà conséquente, de leurs premières applications ne cesse de s'allonger.

Technologies transversales, irriguant de multiples secteurs d'activités, révélant et libérant des capacités que la matière ne dévoile pas à un niveau supérieur d'agrégation, les nanotechnologies recèlent un potentiel de développement économique et de création d'emplois incontournable pour le devenir de notre pays et celui de l'humanité toute entière.

Dans le but de développer cette science, on propose un instrument pour l'élaboration des poudres nanocristallines, un broyeur nouveau qui fonctionne par mécanisme bielle manivelle.



Notre travail est basé sur le calcul de ces différentes valeurs de forces énergétiques et élastiques en faisant varier les paramètres de broyage.

Le plan de ce mémoire se présente de la façon suivante :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les nanomatériaux, leurs propriétés, leurs applications et leurs modes d'application particulièrement le domaine aéronautique ainsi que leurs modes d'élaboration, plus précisément la mécanosynthèse.
- Dans le deuxième chapitre, on donne une étude cinématique du broyeur mécanique fonctionnant par système bielle manivelle et toutes les équations qui régissent son mouvement, plus particulièrement celle de la vitesse de la bille.
- Nous développons dans le troisième chapitre l'aspect énergétique et modélisation dans le procédé de mécanosynthèse et plusieurs équations relatives qui le régissent.
- Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons développé un programme numérique pour le calcul des forces énergétiques et élastiques, et discussion des résultats et des graphes obtenus.

# **Chapitre I :**

## **Etude bibliographique**

# Chapitre I

## ETUDES BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1 Introduction :

Lors de la dernière décennie ont été étudiés les matériaux nanostructurés qui ont constitué une nouvelle classe de matériaux, présentant non seulement un intérêt sur le plan fondamental (compréhension de la physique qui gouverne la croissance, la structure et les propriétés de ces matériaux), mais offrant également la perspective de réaliser des matériaux aux propriétés contrôlables et très souvent attrayantes dans de nombreuses applications.

La caractéristique commune des matériaux nanostructurés est la variation à l'échelle nanométrique (de quelques nm jusqu'à des dizaines de nm) d'au moins un des paramètres microstructuraux (dimension, taille des grains, composition chimique, densité atomique, orientation cristallographique). Les dimensions recherchées dans les matériaux nanostructurés sont en général inférieures à 100 nm, car c'est dans cette gamme de dimension que diverses propriétés commencent à évoluer de manière significative en raison d'un certain nombre d'effets liés au confinement. Les matériaux nanostructurés sont synthétisés artificiellement par une large variété de méthodes physiques, chimiques et mécaniques et peuvent être classés en fonction de leur dimensionnalité. Par exemple, certaines de ces propriétés changent en fonction de la méthode utilisée.

De nombreux laboratoires mènent activement des recherches à caractère pluridisciplinaire dans ce domaine. Les applications potentielles de ces "nanomatériaux" sont extrêmement variées et intègrent plusieurs domaines, allant du magnétisme à l'optique en passant par la chimie, la mécanique, . . . De ce fait, les termes nanomatériaux et nanochimie sont indissociables. Ainsi, les progrès enregistrés dans l'étude des nanostructures résultent à la fois de la maîtrise des méthodes de synthèse et de la performance des moyens d'observation à l'échelle atomique.

## I.2 Nanomatériaux :

### I.2.1 Définition :

Les nanomatériaux peuvent être définis de la façon suivante :

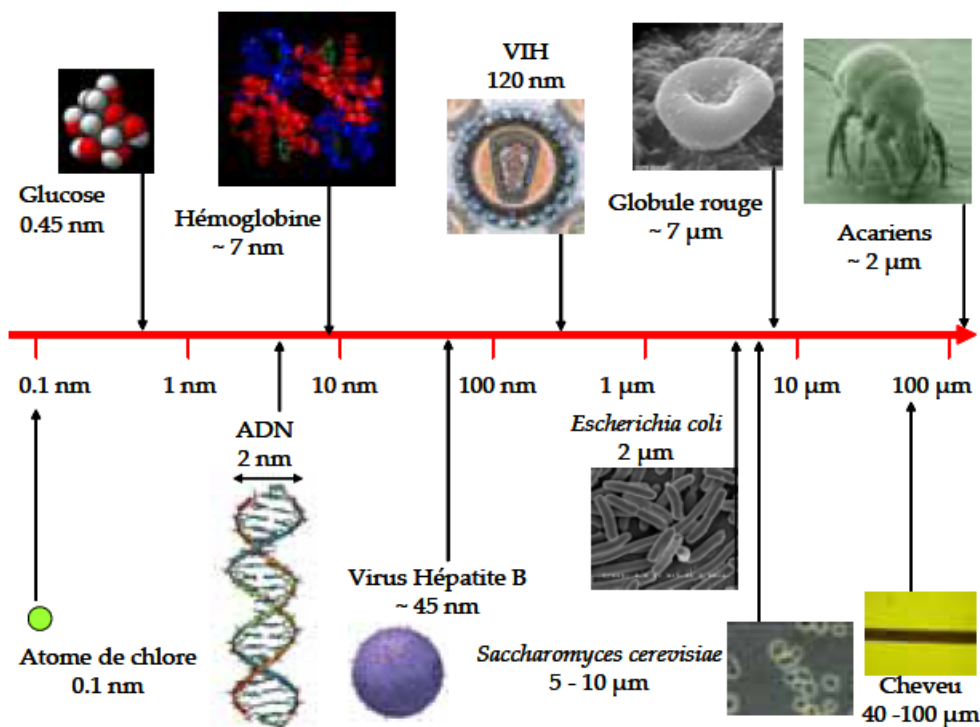


Figure I.1- Exemples d'objets présents dans la nature dans une échelle de taille en nanomètre

"nanomatériau" un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm [1] il est composé de nanostructures qui peuvent être des nanoparticules, des nanotubes (comme les nanotubes de carbone), des nano cristaux. Du fait de la petite taille des structures qui les composent, les propriétés des nanomatériaux diffèrent de celles des matériaux ordinaires.

La conception de nanomatériaux concerne des applications très diverses. Exemple emblématique : les nanomatériaux à base de nanotubes de carbone, dont on envisage

l'utilisation en nanoélectronique (composants), en médecine (transport de médicaments dans l'organisme), en informatique (mémoires d'ordinateurs). Et bien sur en domaine d'aéronautique.

On fabrique également toutes sortes de nanomatériaux dits composites (association de matériaux a priori non miscibles). Le principe est d'introduire des nanostructures, par exemple des nanoparticules, dans une matrice (métal, matériau organique...), pour obtenir des propriétés spécifiques de dureté, de résistance mécanique, de conductivité ou d'isolation électrique... Il est donc désormais possible de construire des matériaux sur mesure. Les enjeux économiques sont immenses [2].

Les nano-objets sont utilisés soit en tant que tels (comme catalyseur, pour transporter des médicaments, pour le polissage de wafers et disques durs en microélectronique...), soit en vue d'élaborer des matériaux. Ces matériaux peuvent être regroupés selon 3 familles de produits:

- Les matériaux nano-chargés ou nano-renforcés,
- Les matériaux nano-structurés en surface,
- Les matériaux nano-structurés en volume.

## I.2.2 Classification des nanomatériaux

Nous pouvons distinguer quatre familles de nanomatériaux, en fonction de leurs formes d'utilisation: les matériaux de dimension 0 sous forme dispersée, aléatoire ou organisée, les matériaux de dimension 1 sous forme de nanofils ou de nanotubes, les matériaux de dimension 2 sous forme de couche mince, et enfin les matériaux de dimension 3 sous forme compacte comme dans les céramiques et les métaux nanostructurés [3] :

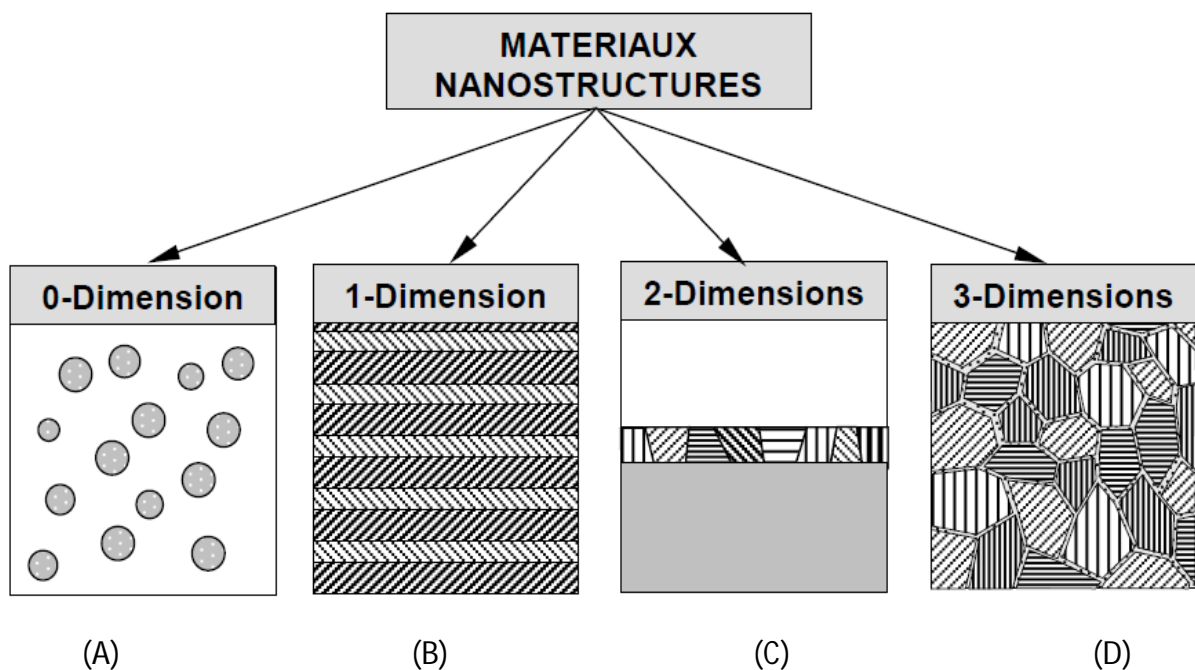


Figure I.2 : Classification des nanostructures selon leur dimensionnalité

- (a) nanoparticules ou amas d.atomes.
- (b) multicouches constituées de couche d'épaisseur nanométrique.
- (c) couches simples nanostructurées.
- (d) matériaux nanocristallins ou nanostructurés à 3D

### A. Matériaux de dimension 0

On désigne par nanocapsules les nanostructures creuses, dans lesquelles on peut introduire des substances comme des catalyseurs, nanoparticules ou cellules biologiques. Ces structures peuvent donc permettre le transport de médicaments par exemple. Ces nanocapsules ont une solubilité élevée et une résistance potentielle aux enzymes gastriques pour les applications médicales [3].

On désigne par fullerènes les formes de carbone pur dont la structure est constituée de pentagones et d'hexagones. La forme la plus courante des molécules de fullerène est constituée de 60 atomes de carbone et a un diamètre d'environ un nanomètre. Ces nanostructures sont antioxydants, ont une bonne résistance physique et possèdent des propriétés de supraconductivité à des températures très basses (absence de résistance électrique).

### B. Matériaux de dimension 1

On désigne par nanofils les nano-objets longilignes dont les dimensions de la section vont d'un nanomètre à quelques dizaines de nanomètre et leur longueur de 500 à 10.000 nanomètre [3].

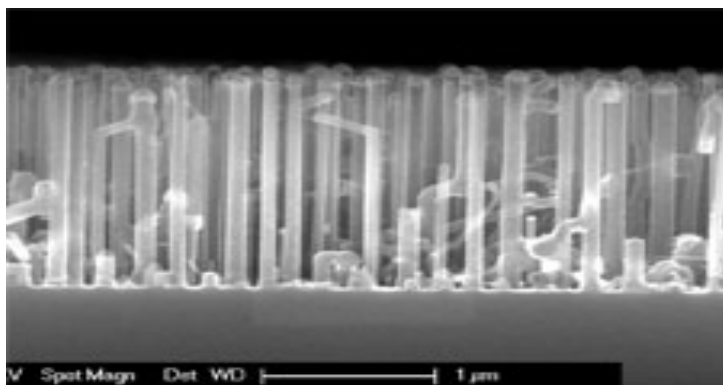


Figure I.3 présentations microscopique des nano-fils

Les nanotubes de carbone par exemple sont des nanofils aux nombreuses propriétés, constitués d'un ou de plusieurs tubes concentriques. Ils sont formés d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal ainsi que de deux demi-molécules de fullerène à chaque extrémité. Ces nanotubes de carbone sont flexibles, résistants, très bon conducteurs, et légers. Ils peuvent résister à de très grandes forces de tension et de compression.

On désigne par tétrapodes les nano-objets ayant une forme tétraédrique (comportant quatre « jambes ») [3].

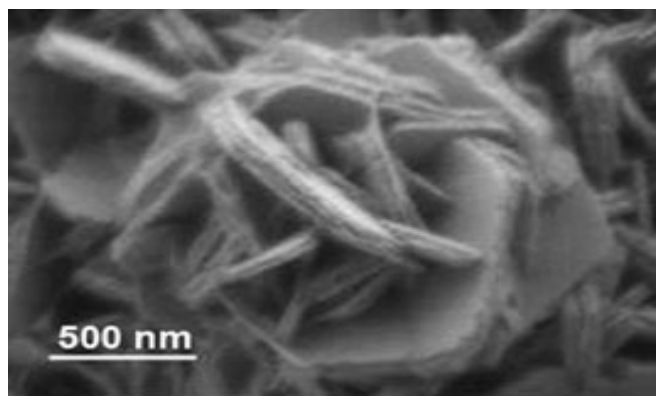


Figure I.4 : nanotétrapodes vus au microscope numérique

Ces nanostructures possèdent des propriétés physiques optiques, de semi-conduction, piézoélectriques et pyroélectriques particulières.

### **C. Matériaux de dimension 2**

Ces matériaux sont utilisés pour créer des revêtements, pouvant être réalisés à partir de nano-couches élémentaires ou de multi-nanocouches. L'intérêt est de doter la surface de propriétés mécaniques (dureté), liées à l'eau (hydrophobe, hydrophile, antiadhésif), chimiques (résistance à la corrosion), thermiques (résistance à la chaleur [3], isolation), biologiques, électroniques, magnétiques ou encore optiques.

### **D. Nanomatériaux de dimension 3**

Les matériaux nanocomposites disposent de propriétés physiques particulières de par leur structure intrinsèque (porosité, présence d'un réseau nanocristallin, microstructure), et ont une grande surface d'échange de par leurs formes complexes. Les nanoparticules sont produites dans une matrice, ce qui permet de changer des propriétés mécaniques, thermiques, magnétiques ou optiques [3].

On distingue les composites à matrice organique, ceux à matrice polymère, à matrice métallique, ou encore à matrice céramique pour les hautes températures. Mais les propriétés sont aussi en fonction des renforts de différentes géométries contenus dans ces matrices [3].



### **I.2.3 Nanotechnologie :**

La nanotechnologie est l'avancée de la science. A présent nous pouvons créer des robots à la taille atomique. C'est à dire  $10^{-9}$  mètre.

La nanotechnologie, n'est autre que la science du futur. Bien sur il y en aura d'autres, on peut penser à la fusion dans le nucléaire, mais toutes les sciences du future restent encore impossibles. Il ne faut pas oublier que la fusion est à l'heure d'aujourd'hui impossible, et même certains scientifiques disent qu'elle ne se fera jamais réellement. On peut alors retrouver cette science du futur un peu partout. En effet la nanotechnologie est présente dans de différents secteurs, comme par exemple, l'informatique, la médecine, l'électronique, la mécanique, la biologie, la chimie et l'optique. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la nanotechnologie dans le secteur aéronautique [4].

Tout d'abord, cela permet de faire des pièces bien plus petites que les autres et bien plus performantes. Car grâce à leur taille elles pourront donc être intégrées plus facilement dans des systèmes.

De plus nous pouvons nous en servir dans les composants d'un ordinateur, n'oublions pas que ces pièces ont des couts réduits en matériaux, de par leurs taille réduite [4].

Pour finir, elle peut servir dans de nombreux domaines que nous ne voyons pas à l'œil nu, mais dans le futur, elle sera certainement utilisée au quotidien.

### **I.3 Les procédés d'élaboration des nanomatériaux :**

Depuis un demi-siècle environ, sont apparues des techniques nouvelles de refroidissement rapide, de chimie dite douce, techniques sol-gel par exemple, qui permettent d'accéder à des tailles de grain beaucoup plus faibles.

D'autres méthodes de production sous arc électrique, laser, plasma ou micro-ondes ont permis d'accéder à des matériaux particuliers de très petite taille.

Il a été ainsi possible d'obtenir des tailles de grain de dimensions de l'ordre des tailles caractéristiques des défauts qui gouvernent certaines propriétés comme :

- Les dislocations (propriétés mécaniques),
- Les parois de Bloch (propriétés ferromagnétiques),

- Les phénomènes qui n'interviennent qu'à l'échelle du nanomètre ou en dessous (effet tunnel, effets de « confinement » lorsque la taille des particules est inférieure à la longueur d'onde des particules – électrons, photons – qui interviennent dans le phénomène étudié).

Ces dimensions, selon les cas, varient entre quelques nanomètres et 100 nanomètres.

En parallèle de cette démarche de miniaturisation, dite "top-down", se développe une autre démarche, dite "bottom-up", qui consiste à construire de façon contrôlée à partir d'atomes et de molécules de nouveaux édifices et structures. Les procédés d'élaboration de ces matériaux constituent un champ d'investigation nouveau qui reste à développer.

Les procédés actuels permettant l'élaboration de nano-objets sont classés en 3 grandes catégories :

- Elaboration par voie physique,
- Elaboration par voie chimique,
- Elaboration par méthode mécanique.

Compte tenu de la complexité des applications et de l'évolution rapide des techniques, il paraît difficile de donner une liste exhaustive des procédés utilisés ou en développement.

Quelques exemples parmi les procédés les plus couramment utilisés pour la fabrication de nano-objets sont présentés ci-après.

### **I.3.1 Elaboration par voie physique**

L'élaboration des nano-particules (amas) peut être réalisée à partir d'une phase vapeur. Cette phase est extraite d'un matériau source par chauffage (fusion en creuset ou sans creuset), par bombardement (faisceau d'électrons, pyrolyse laser). Dans la plupart des cas, la vapeur du solide que l'on souhaite former est refroidie par collisions avec un gaz neutre et devient donc fortement sursaturante (condensation en gaz inerte). Le matériau est collecté le plus rapidement possible sur une paroi froide, de façon à éviter la croissance ou la coalescence des amas. Souvent, l'appareil d'élaboration dispose d'un sas réunissant la chambre de collecte des poudres et le dispositif de compaction afin d'éviter toute pollution atmosphérique. Les poudres nanométriques sont en effet très réactives ; elles peuvent même dans certains cas être pyrophoriques!

Une autre voie d'obtention de nano-poudres consiste à utiliser l'action de micro-ondes sur des poudres de taille millimétrique. Cette technique a comme avantages d'être non polluante et adaptée à une production en continu de poudres de toute nature.

### **1.3.2 Élaboration par voie chimique :**

Sont listées ci-dessous quelques techniques de fabrication par voie chimique couramment utilisées.

#### **▪ Les réactions en phase vapeur**

Les matériaux précurseurs vaporisés sont introduits dans un réacteur CVD (Chemical Vapor Deposition) dans lequel les molécules de précurseurs sont adsorbées à la surface d'un substrat maintenu à une température adaptée. Les molécules adsorbées sont soit décomposées thermiquement, soit elles réagissent avec d'autres gaz ou vapeurs pour former un film solide sur le substrat.

Cette technique est utilisée pour l'élaboration de certains nanomatériaux tels que les quantum de semiconducteur, les matériaux nanostructurés céramiques, les nanotubes de carbone, le diamant.

#### **▪ Les réactions en milieu liquide**

La synthèse en milieu liquide est le plus souvent effectuée à partir d'une solution aqueuse ou organique contenant les réactants. La précipitation des nanoparticules est obtenue par une modification des conditions de l'équilibre physico-chimique. Sont distinguées :

- la co-précipitation chimique, technique facile à mettre en oeuvre et la plus utilisée pour des productions industrielles à fort volume de matériaux de base bon marché,
- l'hydrolyse permettant de produire des particules fines, sphériques avec une pureté chimique améliorée, une meilleure homogénéité chimique et un contrôle de la taille des particules.

- **Les techniques sol-gel**

Les techniques sol-gel permettent de produire des nanomatériaux à partir de solutions d'aloxydes ou de solutions colloïdales. Elles sont basées sur des réactions de polymérisation inorganiques.

L'intérêt du procédé sol-gel réside dans la possibilité de contrôler l'homogénéité et la nanostructure au cours des premières étapes de fabrication.

Cette technique permet la production de pièces massives mais aussi de dépôts superficiels sur des plaques ou des fibres. Elle est également utilisée pour la production de composites fibreux.

Les matériaux issus du procédé sol-gel couvrent presque tous les domaines des matériaux fonctionnels : optique, magnétique, électronique, super conducteur à haute température, catalyseur, énergie, capteurs, etc.

**Avantage :**

cette technique permet de contrôler efficacement la taille des particules et l'homogénéité de la distribution des particules. Ce procédé est réalisé à des températures plus basses que pour les autres procédés.

**Inconvénients :**

- coût élevé des matériaux de base,
- faible rendement et produits de faible densité,
- résidus de carbone et autres composés, certains composés organiques étant dangereux pour la santé.

### **I.3.3 Élaboration par voie mécanique :**

#### **Mécanosynthèse :**

La technique dite mécanosynthèse consiste généralement à broyer des poudres micrométriques (1 à 30  $\mu\text{m}$ ) de plusieurs alliages pour les incorporer.

La caractéristique essentielle de cette technique est de permettre l'obtention de nanoprecipités ou nano-objets dispersés de façon homogène au sein de la matrice.

Elle est par ailleurs adaptée à la production de matériaux en quantité qui s'expriment en kilogrammes, voire en tonnes, contrairement aux autres techniques.

#### **Consolidation et densification :**

Lors d'un travail mécanique intense (métaux et intermétalliques uniquement), le processus qui permet de convertir un matériau pulvérulent en une pièce massive comporte deux étapes : une opération de compactage mécanique et une opération de frittage, libre ou sous charge.

- compactage à froid : Opération qui peut s'effectuer soit par pressage à sec, soit, dans les cas difficiles, par addition d'un lubrifiant ou par pressage humide.

Le compactage humide est bien adapté aux céramiques et surtout aux oxydes.

Avantage du compactage humide : gain considérable sur la température ou le temps de frittage.

- frittage : opération qui permet, par diffusion atomique à chaud, d'établir des ponts de matière entre les grains et ensuite de réduire la porosité.
- par Compression Isostatique à Chaud (CIC): on réalise ainsi les deux opérations ci-dessus en une seule étape.
- croissance des grains pendant la densification : l'enjeu le plus important pour les procédés de frittage des nanomatériaux est d'éviter la croissance des grains pendant la densification.

**Forte déformation :**

La forte déformation d'un matériau cristallin (métal, céramique) provoque un raffinement de sa structure jusqu'à obtenir une taille de grains de quelques dizaines de nm.

Différentes techniques peuvent être utilisées (par torsion, extrusion...).

• **Définition :**

La mécanosynthèse ou broyage à haute énergie est une méthode mécanique qui permet la fabrication de poudre à grains nanométrique. Par cette technique, il peut également y avoir des réactions chimique entres des poudres cobroyées ou entre poudre et atmosphère de broyage, il en résulte des transformations chimique ou structurale [5]. Durant le broyage haute énergie, les particules de poudres sont present au piège entre bille et bille ou entre bille et parois des jarres. Par conséquent, il se produit une déformation plastique et une élévation locale de la température. Les particules sont alors aplaties, fracturées puis soudées (collage – décollage). Lorsqu'un certain équilibre s'installe entre le taux de rupture et le taux de soudage, on parle d'état d'équilibre. Le collage (soudage) tend a augmenter la taille moyenne des particules. Par contre, la rupture tend à diminuer leur taille moyenne (figure 2. 1). [6] Les petites particules résistent à la déformation sans être fracturées et tendent à être soudées sous forme d'agglomérat.

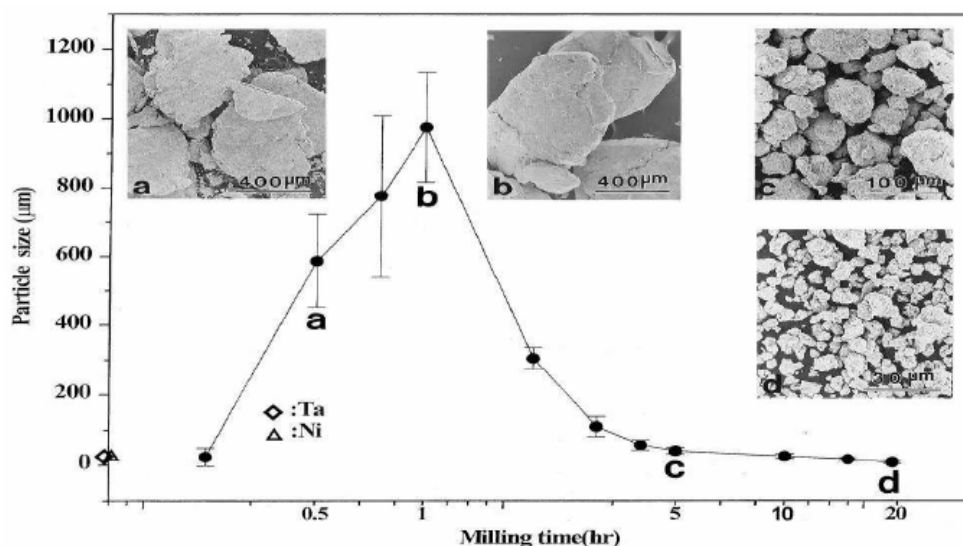


Figure I.5- Distribution de la taille des particules provoquée par la tendance des petites particules à se souder et les grandes particules à se fracturer dans les conditions d'équilibre.

## I.4 Types de broyeurs :

Différents équipement, peuvent être utilisés pour la production de poudres par mécanosynthèse.

Les principaux broyeurs utilisés sont trois types : broyeur attriteur, broyeur vibratoire et broyeur planétaire.

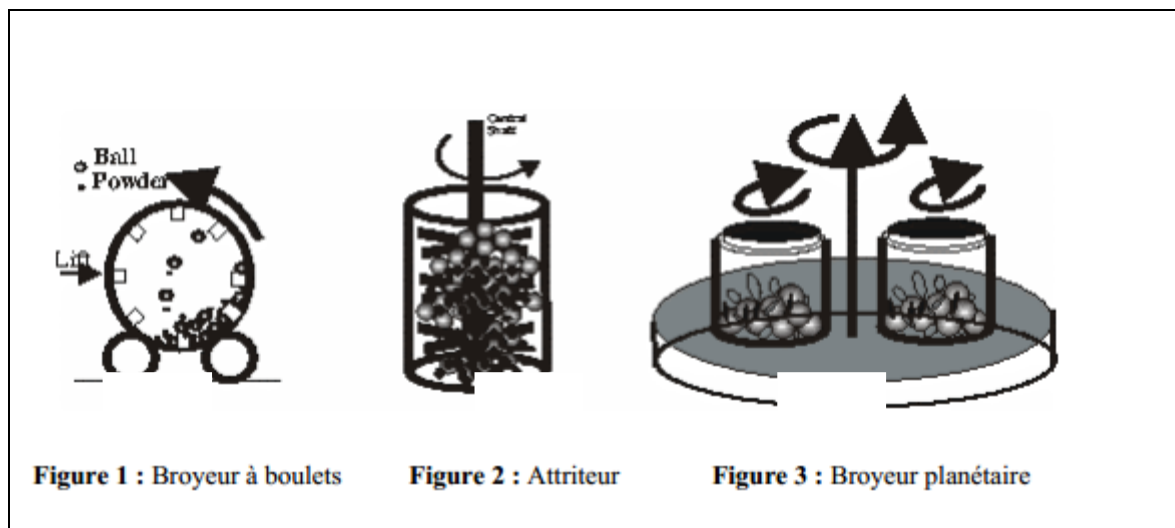
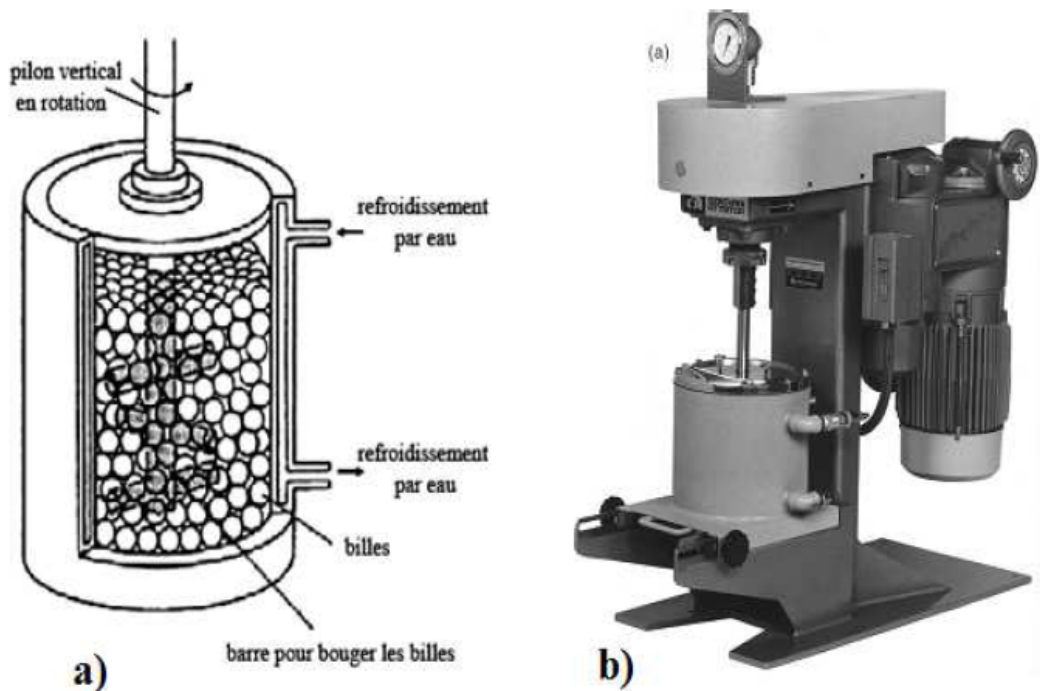


Figure I.6- Schématisation des différents types de broyeur

### I.4.1 Broyeur attriteur :

Il est constitué d'un caisson vertical, d'un axe agitateur sur lequel sont fixés des barres perpendiculairement (figure 1.7). Le broyage agit uniquement par frottements des billes sur la poudre [7]. Les broyeurs attriteurs sont utilisés pour la synthèse d'une grande quantité de poudre de 0.5 à 40kg. Ce type de broyeur est utilisé pour le broyage à basse énergie. Il est commercialisé par Union process, Akron, OH, Fritsch ou SPEX [8].



#### I.4.2 Broyeur vibratoire :

Le principe du broyeur vibratoire est basé sur un mouvement de vibration à haute fréquence (20Hz) d'un cylindre contenant la poudre à broyer et des billes. Le broyeur vibrant le plus couramment utilisé est le SPEX 8000, pouvant contenir de 2 à 40 billes et traiter une quantité de poudre de l'ordre de 10 g (voir figure 1.8). Le broyage se fait uniquement par chocs [7].



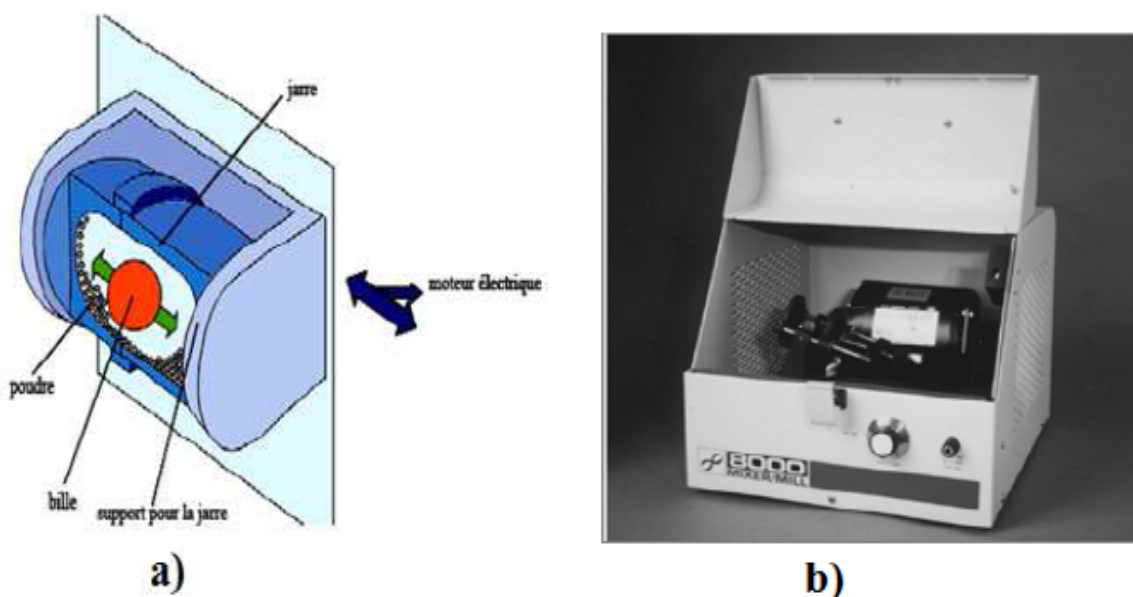


Figure I.8- Broyeur vibratoire : a) principe de fonctionnement, b) modèle SPEX 8000

### 1.4.3 Broyeur planétaire

Son principe réside dans la mise en rotation d'un plateau sur lequel on dispose des jarres tournant sur elle-même dans le sens opposé (figure 1.9). La combinaison de ces mouvements crée un effet de frottement des billes qui restent collées contre la paroi avant d'être renvoyées violemment par la force centrifuge contre la paroi. Les poudres sont ainsi soumises à des effets de friction et de choc. Selon les cas, une réaction entre les poudres à broyer et le matériau constituant les jarres et les billes peut être observée. Pour éviter cela, il est préférable d'utiliser des jarres et des billes de même nature que les matériaux à broyer. Divers matériaux sont disponibles tels que l'acier, le carbure du tungstène, l'agate ou la zircon [9].

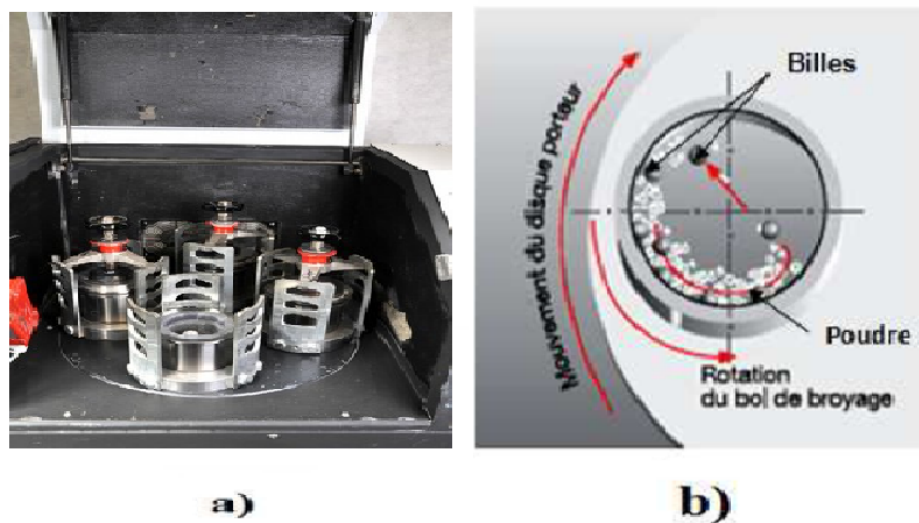


Figure I.9- Broyeur planétaire : a) modèle PM400, principe de fonctionnement, b) principe de fonctionnement

### I.5 La nature des équipements de broyage :

Le type de matériau utilisé pour les jarres et les billes est très important lors du broyage puisque à chaque impact des billes sur les parois des jarres, des matériaux peuvent se disloquer et s'incorporer dans le matériau final. Ainsi si le matériau constituant les jarres et les billes est différent de la poudre, on assiste à une contamination de la poudre. Pour éviter ce cas de figure il est conseillé d'utiliser des jarres et des billes de même nature que la poudre, ce qui n'est possible qu'en de rares occasions.

### I.6 L'application des nanomatériaux :

Les nanotechnologies trouvent de nombreux domaines d'application, comme par exemple les économies d'énergie pour les moyens de transport, le développement des énergies renouvelables, le traitement des pollutions, les matériaux de construction, les applications médicales, la cosmétique, la pharmacie, les technologies de traitement de l'information, l'optique, les textiles, ou encore les peintures.

Ces technologies se développent donc et vont continuer à se développer rapidement. Elles sont d'ores et déjà utilisées dans l'industrie, comme par exemple lors de la fabrication des pneumatiques [10].

Nous nous intéresserons ici à la fabrication des nanoparticules et à leurs applications, notamment dans l'environnement et surtout dans le domaine aéronautique.



Figure I.10- représentation d'un model d'avion

### **I.6.1 Applications des nanomatériaux dans l'aéronautique:**

Le succès de l'industrie de l'aviation dépend de divers facteurs allant de la réduction de poids, la disponibilité des matériaux ayant des propriétés multifonctionnelles, éco-carburants favorables, une consommation de carburant inférieure, des systèmes de communication plus rapides et très réactives, des réparations moindre, une vie prolongée et sécuritaire, et beaucoup plus [11].

La plus part des matériaux utilisés dans les avions, sont renforcés par des nanoparticules qui permettent d'améliorer leur rigidité tout en diminuant leur poids. Les trains d'atterrissage sont aussi renforcés par des nanoparticules recyclables et plus durables. Il s'agit d'agrégats de noir de carbone et de silice qui est incorporés dans le caoutchouc lors de la fabrication d'un pneu, ces charges de renfort de dimension nanoparticulaires sont indispensables à la performance des pneumatiques car elles renforcent la résistance à la rupture et à l'abrasion du pneu et contribuent ainsi à la réduction de la consommation de carburant. Des nanoparticules sont aussi intégrées dans de nombreux éléments : peinture extérieure insalissable, plastiques inflammables et peu coûteux, textiles et recouvrements autoréparables [11].

Les nanomatériaux peuvent être utilisés principalement dans quatre domaines de l'industrie de l'aviation [12] :

**A. Structure de l'aéronef :**

L'utilisation des nanomatériaux permet d'obtenir des matériaux légers qui ne compromettent pas la résistance et qui réduisent la consommation en carburant [12], quelque exemple sont cités :

1. Nano-composites polymères (NTC, BN, NCF) pour une haute résistance-à-poids, résistance élevée aux chocs et la protection contre les rayonnements ;
2. L'auto-guérison ou la réparation des matériaux ;
3. Nanocomposites à base d'argile pour renforcement structurel et résistance à la chaleur ;
4. Nanomatériaux pour l'absorption acoustique ;
5. Revêtements métalliques nanostructurés pour train d'atterrissage - une meilleure résistance à la corrosion et d'usure ;
6. Dépôt de nanopoudres sur les surfaces vitrées (nettoyage auto et anti-éblouissement) ;
7. Des métaux et des céramiques nanorenforcer, a fin d'améliorer la fragilité et la ténacité [13].



Figure I.11- l'intérieure d'un avion « structure interne »

### **B. Les revêtements et peintures :**

Céramique déjà en usage; par exemple  $ZrO-8mol\% Y2O3$  dans les revêtements pour turbines à gaz et des jupes moteurs à réaction [12].

Développements en cours:

1. Nano-revêtements pour alliages de magnésium – pour une meilleure résistance aux corrosions ;
2. Nano-revêtements pour réduire la traînée – amélioré l'efficacité aérodynamique ;
3. Diamond comme film pour une meilleure résistance à l'usure ;
4. Revêtements de barrière thermique à base de  $ZnO$  ;
5. Revêtements super-hydrophobe, par exemple une aube de turbine à gaz dont les parties repoussent la saleté ;
6. Nano-pigments en céramique : la peinture ne perd pas de couleur lorsqu'elle est exposée à un rayonnement UV .



Figure I.12- Revêtement nano structuré

### C. Les nanomatériaux dans les moteurs d'aéronefs :

On cite quelques applications des nanomatériaux dans la motorisation :

- Nano-grain des alliages;
- la dispersion Nano renforcée alliages et des polymères;
- Nanostructure des revêtements protecteurs;
- les matériaux électriques et magnétiques;
- Les capteurs et actionneurs;

Les avantages de l'utilisation des nanomatériaux dans un moteur [14]:

- Augmentation de l'efficacité du moteur et de la fonctionnalité ;
- Réduction de l'impact environnemental ;
- une résistance accrue ;
- Augmentation de la capacité de la température - les températures extrêmes ;
- Réduction des coûts.

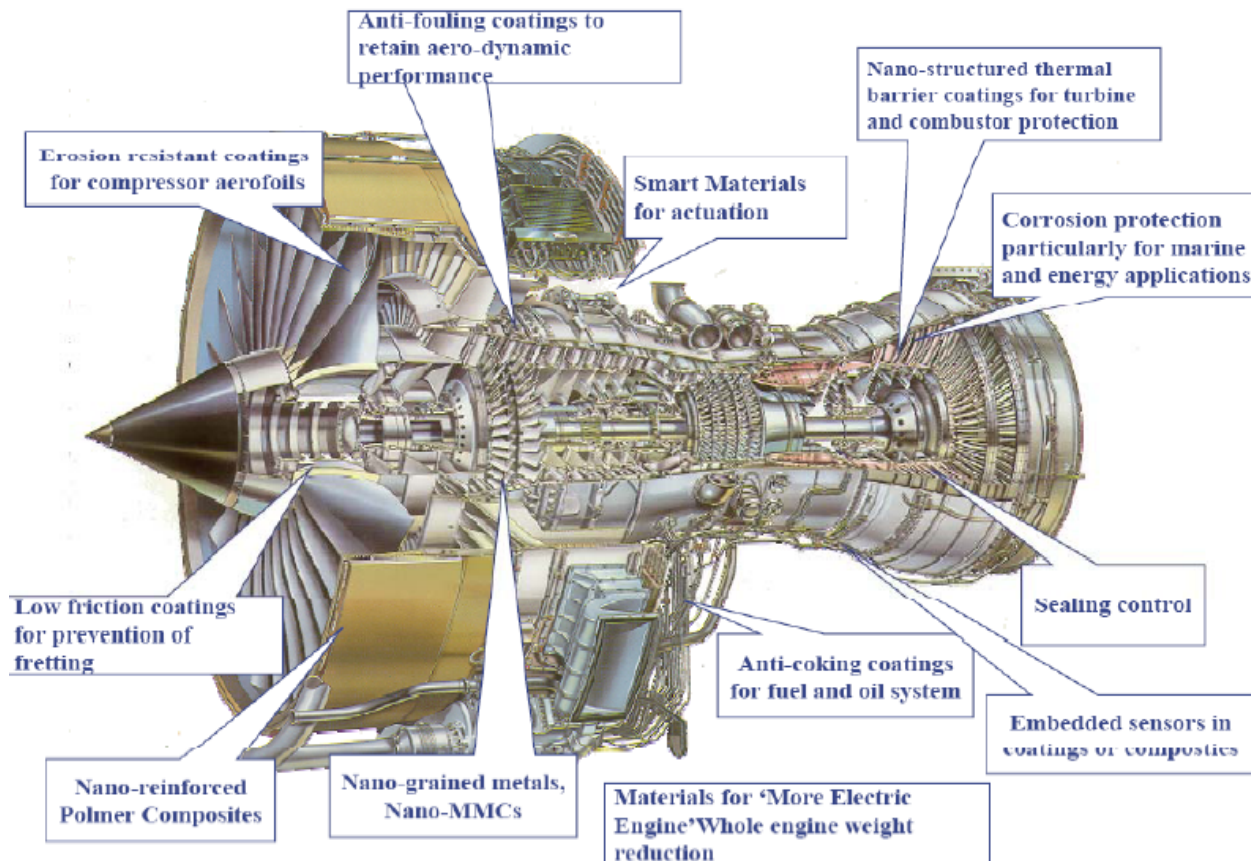


Figure I.13- l'application des nanomatériaux dans les Moteurs d'aéronefs

#### D. Intérieur de l'avion :

Le développement des nanotechnologies est à l'origine de plusieurs évolutions capitales dans le domaine de sécurité, de confort et d'hygiène.

Quelques exemples d'applications sont cités ci-dessous :

- Composites polymères nanoargile pour une meilleure résistance à la flamme ;
- Capteurs chimique et biologiques de toxines et des émissions gazeux ;
- Nanomatériaux pour l'application de souffle et de balistiques;
- Hygiène, ajout de nanoparticules ayant une activité anti-micorbial, exemple: des nanoparticules d'argent pour les selleries et les tapis [14] ;
- Des écrans plats de nanotubes, des chercheurs du CEA ont réussi à fabriquer un écran plat de télévision en faisant pousser un nanotube en face de chaque pixel de l'écran. Le nanotube conduit les électrons directement au bon endroit. Sa production industrielle est d'ores et déjà lancée [14].



Figure I.14- l'utilisation de nanomatériaux dans l'intérieur d'avion

### **I.6.2 Autres applications aérospatiales des nanomatériaux :**

- Ajout de nanoparticules (Al à l'hydrogène liquide) pour augmenter l'énergie de propulsion ;
- Ajout de nanoparticules (oxyde de fer) comme un catalyseur pour les propergols solides ;
- Les lubrifiants, non dangereux nano-fluides pour une utilisation hydraulique ;
- Les textiles techniques (vêtements et des équipements pour l'exploration spatiale) ;
- Les appareils électroniques nanométriques (batteries longue durée) ;
- Nanomatériaux pour fournir une protection contre le rayonnement cosmique [14].



# **Chapitre II :**

## **Etude cinématique du broyeur mécanique**

## Chapitre II

# Etude cinématique du broyeur mécanique

### II.1 Introduction

Notre broyeur mécanique, qui est conçu pour l'élaboration des poudres nanométriques, fonctionne par un système bielle-manivelle, est un modèle de mécanisme qui doit son nom aux deux pièces qui le caractérisent. En occident, il apparaît à l'aube de la Renaissance et constitue une innovation de rupture qui vient s'ajouter aux cinq chaînes cinématiques simples héritées des mécaniciens grecs. En Chine, il apparaît dès le 1<sup>er</sup> siècle de notre ère et y a permis aux moulins à eau d'être très tôt utilisés comme moyen de transformer l'énergie hydraulique en énergie mécanique pour toutes sortes d'usages (notamment pour activer les soufflets des hauts fourneaux apparus très tôt également).

La figure 2.1 présente un schéma de principe, où :

- OB : C'est la « manivelle » de rayon  $r_m$ , elle est entraînée par la vitesse angulaire  $\omega$  ;
- AB : représente la « bielle » de longueur  $l_b$ , tel que A est appelé pied de bielle et B est appelé tête de bielle ;
- pmh : Le Point Mort Haut ;
- pmb : Le Point Mort Bas.

Le pied de bielle décrit une trajectoire rectiligne, entre  $A_0$  (Point Mort Haut) et  $A_1$  (Point Mort Bas); la distance  $A_0A_1$  est la « course » du pied de bielle. Si la droite qui contient cette trajectoire passe par O, le mécanisme est dit à attaque centrale; sinon, le système bielle-manivelle est à attaque excentrée.

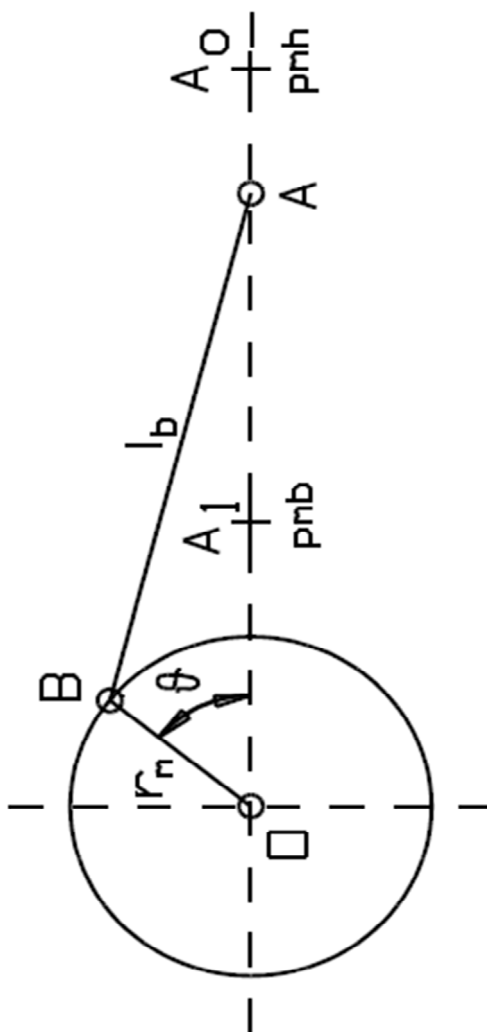


Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'une Bielle manivelle.

Une des méthodes les plus utilisées pour effectuer le broyage mécanique de la poudre, est la méthode d'agitation de la poudre avec la bille caractérisée par la dureté et qui sont continue dans une enceinte étanche appelée la jarre. Cette méthode d'agitation est efficace, car :

- Ce broyeur mécanique a pour avantage une faible consommation d'énergie ;
- Ce broyeur mécanique dont la jarre est dimensionnée selon la taille de la bille en vue d'obtenir un mouvement de choc bien défini de la bille et non aléatoire à l'intérieur de la jarre, et par conséquent une réduction de la friction ainsi que la contamination

de la poudre, puisque dans le cas de la présence de plusieurs billes dans la jarre la friction empêche leurs trajectoires;

- Ce broyeur crée une grande énergie d'impact avec une grande probabilité que la poudre soit piégée entre la bille et la surface de la jarre.

En outre, un schéma d'établissement de la méthode d'agitation, appliquée à notre système de broyeur, est donné dans la figure 2.1.

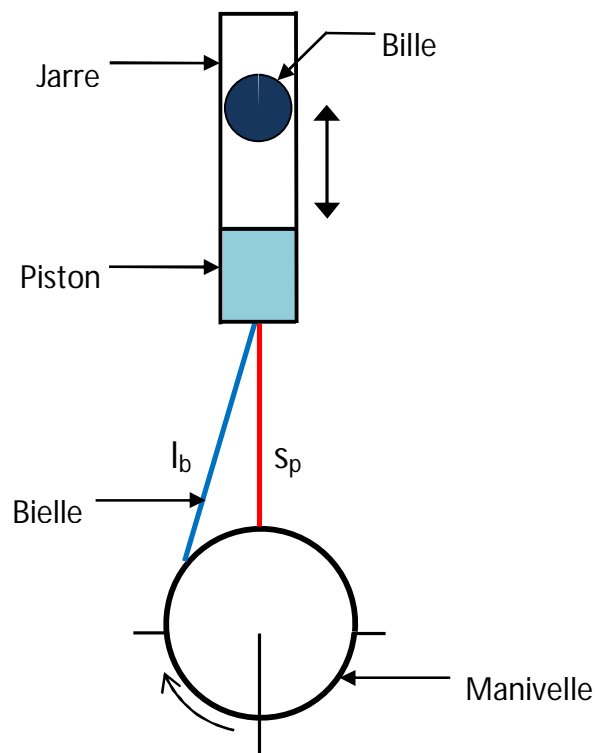


Figure II.2 : Schéma du système d'agitation.

L'appareil est constitué d'une manivelle qui tourne d'un mouvement de rotation pour fournir un mouvement de translation de la jarre, où l'on désigne par:

- $r_v$  : Le rayon de la manivelle ;
- $l_b$  : La longueur de la bielle ;

- $\omega_m$  : La vitesse angulaire de la manivelle ;
- $\theta$  : L'angle de rotation de la manivelle ;
- $S_p$  : La course du piston ou l'amplitude du mouvement de la jarre, est déterminée par l'action de la rotation de la bielle qui, elle est liée par articulation mécanique à la manivelle.

Dans le schéma de la figure, le processus de broyage est opérationnel quand la manivelle est entraînée par un moteur électrique. Sous l'action de la vitesse de rotation de manivelle, la bielle qui en mouvement de rotation fournit un mouvement de translation alternatif au piston. Lorsque celui-ci est en mouvement, la bille et la poudre continuent dans la jarre pourront y ainsi se mettre en agitation grâce au mouvement d'oscillation de la jarre. Par ailleurs, quand la vitesse de la jarre est faible par rapport à celle de la charge de poudre, cette dernière ne pourrait pas se déplacer à partir du bas de la jarre.

Pour que la charge de poudre puisse se déplacer, le mouvement d'oscillation de la jarre doit augmenter. Une fois que cette charge quitte le bas de la jarre, le choc commence et la quantité d'énergie d'impact qui se crée va atteindre son maximum pendant le mouvement ascendant de la jarre et dans laquelle la charge de poudre est en chute libre. Dans ce cas, la plus grande énergie d'impact créée s'achève en augmentant la hauteur de rebondissement de la charge de poudre.

## II.2 Modélisation du broyeur mécanique

On représente dans la figure 2.3 un schéma de modélisation mécanique de notre broyeur pour un système bielle-manivelle.

En supposant que la manivelle tourne à la vitesse angulaire constante  $\omega_v$ , l'angle de rotation  $\theta_v$  à l'instant  $t$  est donné par:

$$\theta = \omega_m t \quad (2.1)$$

Le mouvement de rotation de la manivelle est transformé en un mouvement de translation alternatif du piston par l'intermédiaire de la bielle.

La hauteur de déplacement de ce mécanisme est égale à celle de la course du piston, définie par les pmh (poids mort haut) et pmb (poids mort bas) et qui est donnée par :

$$s_p = r_v \cos \theta + l_b \cos \beta \quad (2.2)$$

Dans la même figure 2.5, on a :

$$\sin \beta = \frac{r_v}{l_b} \sin \theta \quad (2.3a)$$

et

$$\cos \beta = \left( 1 - \left( \frac{r_v}{l_b} \sin \theta \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.3b)$$

On remplace l'équation dans l'équation (2.3b), l'expression de la course du piston devient :

$$s_p = r_v \cos \theta + \left( l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

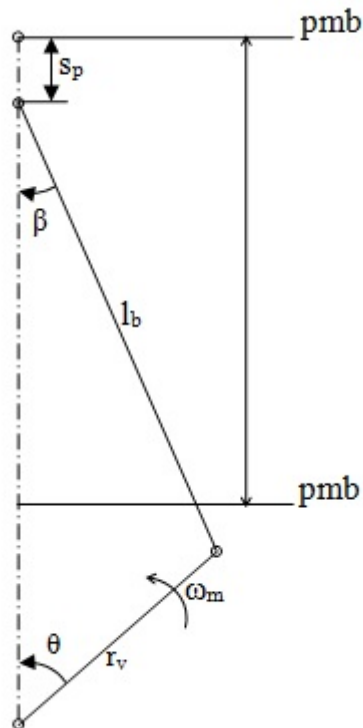


Figure II.3 : Modélisation à un système bille-manivelle.

En se servant du tableau 2.1 donné ci-dessous, et qui représente les paramètres géométriques et dynamiques afin de tracer la course du piston ou la course de la jarre en fonction de l'angle de rotation de la manivelle pour un tour de rotation équivalent de 360°. Cette courbe est représentée dans la figure 2.4.

Tableau II.1 : Paramètres géométriques et dynamiques du broyage.

Longueur de la bielle, $l_b$	77 mm
Rayon de la manivelle, $r_v$	27 mm
Diamètre du piston	60 mm
Vitesse angulaire, $\omega_m$	900 tr/min
Masse et diamètre de la bille	0,238 kg et 40 mm

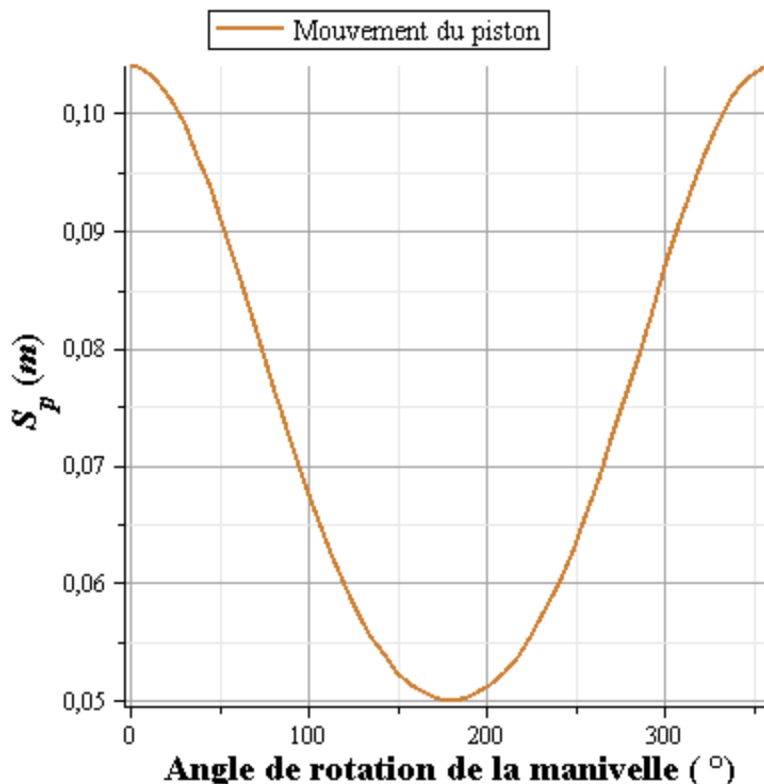


Figure II.4 : La course du piston en fonction de l’angle de rotation de la manivelle à la vitesse de rotation,  $\omega_m = 900$  tr/min.

### II.3 Vitesse du piston ou de la jarre

La vitesse du piston, qui égale à  $v_p$  sera donnée par la dérivée par rapport au temps de la course  $S_p$ , et en tenant compte de l’équation (2.1), cette vitesse est donnée par l’équation (2.5).

$$v_p = \frac{dS_p}{dt} = -r_v \omega_m \sin \theta - \frac{(r_v^2 \omega_m \sin 2\theta)}{2(l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (2.5)$$

La vitesse de la jarre ou la vitesse du piston peut être tracée en fonction de l’angle de rotation de la manivelle pour un tour de rotation équivalent à  $360^\circ$ , cette courbe est donnée dans la figure 2.5 après utilisation des données du tableau 2.1.



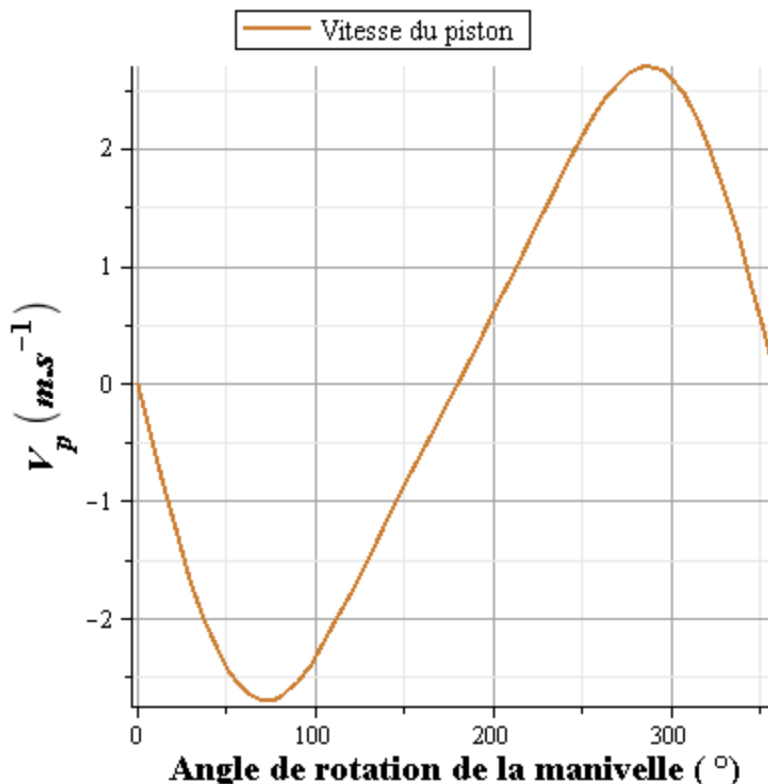


Figure II.5 : La vitesse du piston en fonction de l’angle de rotation de la manivelle à la vitesse de rotation,  $\omega_m = 900$  tr/min.

#### II.4 Accélération du piston ou de la jarre

L’accélération du piston est obtenue par la dérivée de sa vitesse  $v_p$  par rapport au temps, est la suivante:

$$a_p = \frac{dv_p}{dt} \quad (2.6)$$

En remplaçant l’expression de  $v_p$  donnée dans l’équation (2.5) et celle de l’angle  $\theta$  de l’équation (2.1), la nouvelle expression de l’accélération sera donc la suivante :

$$a_p = -r_v \omega_m^2 \cos \theta - \frac{4r_v^2 \omega_m^2 \cos 2\theta (l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta) + (r_v^2 \omega_m \sin 2\theta)^2}{4(l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \quad (2.7)$$

La figure 2.6, donnée ci-dessous, montre l'allure de l'accélération du piston (ou de la jarre) en fonction de l'angle de rotation de la manivelle.

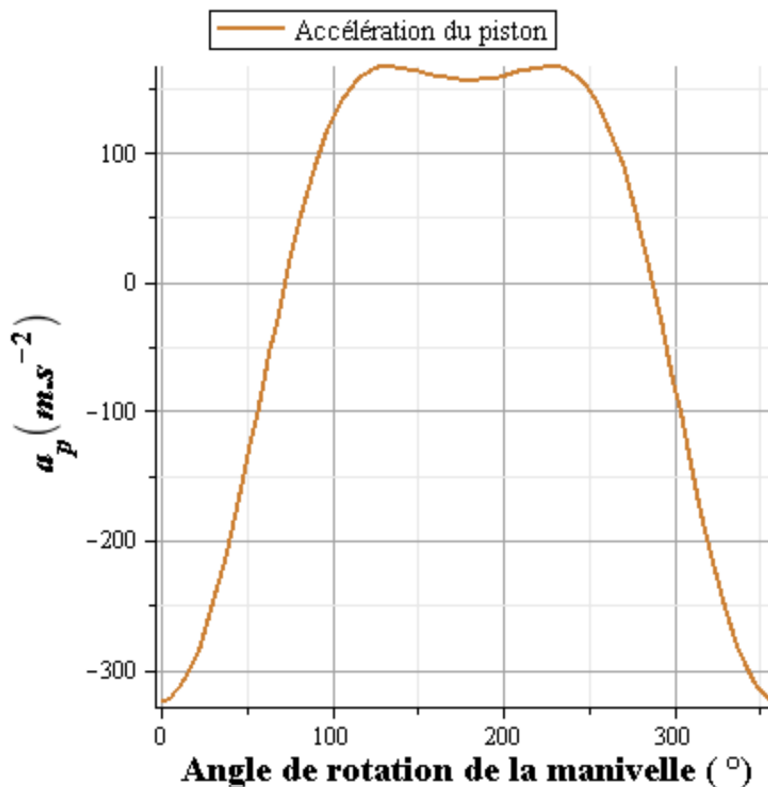


Figure II.6 : L'accélération du piston en fonction de l'angle de rotation de la manivelle à la vitesse de rotation,  $\omega_m = 900$  tr/min.

## II.5 Vitesse de la bille avant son lancement

La vitesse de la bille, c'est la vitesse de la jarre, elle-même est la vitesse du piston, qui égale à  $v_b$ , puisque la bille est toujours au bas de la jarre en état de repos se déplace à même vitesse et accélération de la jarre, d'où :

$$v_b = -r_v \omega_m \sin \theta - \frac{(r_v^2 \omega_m \sin 2\theta)}{2(l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (2.8)$$

De même, la hauteur  $h_b$  et l'accélération  $a_b$  du mouvement de la bille sont respectivement égales à la course et à l'accélération du piston, exprimées par :

$$h_b = s_p \quad (2.9)$$

$$a_b = a_p \quad (2.10)$$

## II.6 Condition de lancement de la bille

Une fois que la jarre atteint son amplitude maximale, elle commence à diminuer son mouvement vers le bas et selon la vitesse de rotation de la manivelle. Comme la bille est indépendante de la jarre, l'accélération de la bille et celle de la jarre ne sont pas égales.

La figure 2.6 montre la trajectoire du mouvement de la bille et de la jarre en fonction du temps. D'après cette figure, nous remarquons qu'au début du mouvement de la jarre dans laquelle la bille se trouve est, y restée immobile où elle est entraînée à la même vitesse de la jarre, comme il est illustré dans la figure 2.6 au niveau des phases (a) et (b).

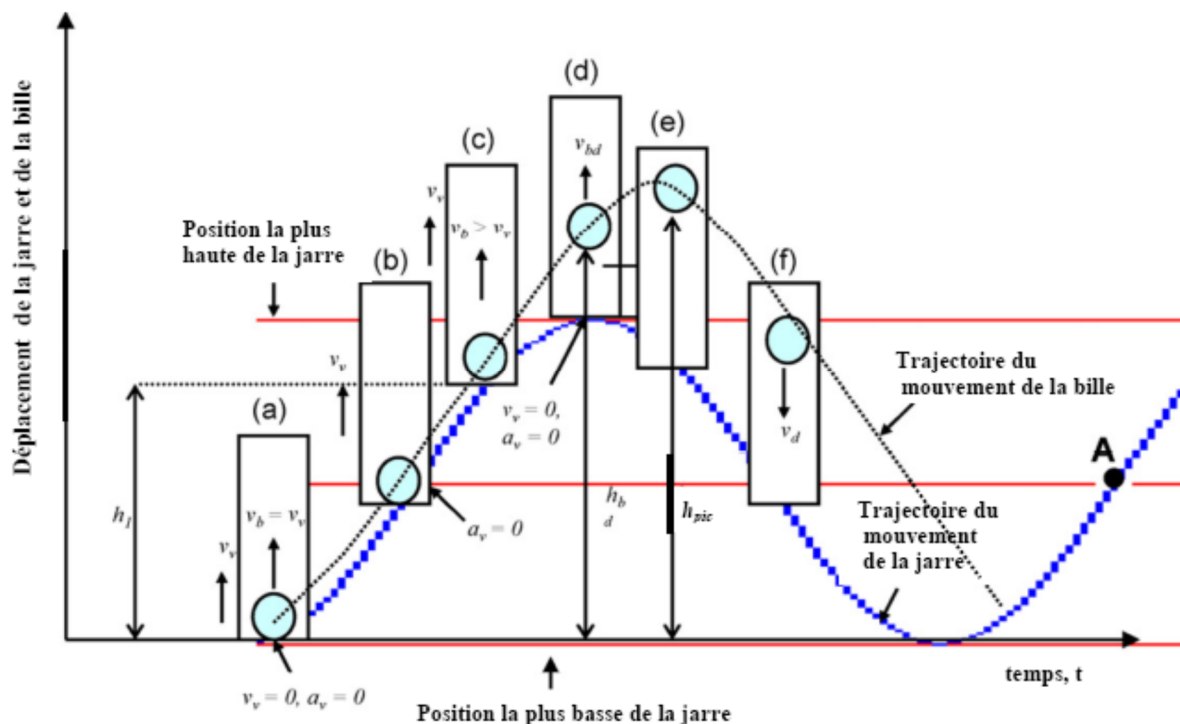


Figure II.7: Trajectoire du mouvement de la jarre et de la bille.

Dans la phase (c), on voit que la vitesse de la bille devient supérieure à la vitesse de la jarre, ce qui veut dire que la bille a quitté le bas de la jarre pour atteindre une hauteur maximale. Une fois la hauteur est atteinte en phase (d) de la même figure, la bille tombe en chute libre pour recommencer un nouveau cycle de mouvement.

D'autre part, la bille dont sa vitesse est maximale en cette phase, ce qui implique que sa dérivée par rapport au temps est nulle.

$$\frac{dv_b}{dt} = a_p = 0 \quad (2.11)$$

C'est-à-dire :

$$-4r_v \omega_m^2 \cos \theta (l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta)^{3/2} - 4r_v^2 \omega_m^2 \cos 2\theta (l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta) + (r_v^2 \omega_m \sin 2\theta)^2 = 0 \quad (2.12)$$

L'équation (2.10) est une équation non linéaire, pour en trouver la solution qui est la racine angulaire  $\theta = \theta_1$ , on a recourt à des méthodes numériques tels que, la méthode Newton ou la méthode de la Sécante.

Pour implémenter le programme en langage Fortran pour la résolution de l'équation (2.12), nous avons utilisé la méthode de la sécante dont l'algorithme est donné ci-dessous, et qu'on affecte l'expression de cette équation à une fonction  $f(\theta)$ , tel que  $\theta$  c'est la variable.

Algorithme de la méthode de la Sécante:

1. Etant donné un critère d'arrêt,  $\epsilon$
2. Etant donné N le nombre maximal d'itération
3. Etant donné  $\theta_0$  et  $\theta_1$  des valeurs initiales proches à la solution
4. Effectuer :

$$\theta = \theta_1 - \frac{f(\theta_1)(\theta_1 - \theta_0)}{f(\theta_1) - f(\theta_0)}$$

$$5. \text{ Si } \left| \frac{\theta - \theta_1}{\theta_1} \right| < \varepsilon$$

– Convergence atteinte

– Afficher la solution

– Arrêter

6. Si le nombre maximal d'itération N est atteint

– Convergence non atteinte

– Arrêter

7. Retour à l'étape 4

### II.6.1 Vitesse de lancement de la bille

Une fois qu'on a déterminé la valeur de l'angle  $\theta_1$ , celle-ci sera substituée dans l'expression de la vitesse du piston définie par l'équation (2.5) afin d'évaluer la vitesse de la bille, est égale à:

$$v_b = -r_v \omega_m \sin \theta_1 - \frac{(r_v^2 \omega_m \sin 2\theta_1)}{2(l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}} \quad (2.13)$$

### II.6.2 Temps initial de lancement de la bille

Ce temps, qu'on désigne par  $t_1$ , est calculé par le rapport de l'angle de départ  $\theta_1$  et de la vitesse angulaire de la manivelle, est égal à :

$$t_1 = \frac{\theta_1}{\omega_m} \quad (2.14)$$

### II.6.3 Hauteur initiale de lancement de la bille

Cette hauteur est désignée par  $h_1$ , est égale à la course du piston  $S_p$  par substitution de l'angle  $\theta$  par l'angle  $\theta_1$ , donnée par:

$$h_1 = r_v \cos \theta_1 + (l_b^2 - r_v^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2} \quad (2.15)$$

### II.6.4 Hauteur atteinte par la bille

Après la phase de départ de la bille où initialement est au bas de la jarre, la bille continue son mouvement pour se déplacer seule vers le haut comme montre la figure 2.6 d. La vitesse de la bille  $v_{bd}$  et sa hauteur  $h_{bd}$  sont données par :

$$v_{bd} = v_b + (-gt) \quad (2.16)$$

$$h_{bd} = h_1 + v_b t + \left(\frac{1}{2}\right)(-gt^2) \quad (2.17)$$

Avec:

$g$ : Accélération de la pesanteur,  $m/s^2$

Nous remarquons que l'équation (2.16) de la vitesse  $v_{bd}$  est fonction du temps, et qui diminue sous l'effet de l'accélération de la pesanteur,  $g$  dirigée vers le bas, alors l'équation (2.17) de la hauteur à atteindre par la bille augmente en fonction du temps.

Ainsi, lors que la bille atteint sa hauteur maximale sa vitesse est nulle, d'où la vitesse  $v_{bd}$  est égale à zéro, cela permet de déterminer le temps  $t$  qui sera substitué dans l'équation (2.18) afin de déterminer la hauteur maximale atteinte par la bille, désignée par  $h_{pic}$  :

$$h_{pic} = \frac{v_b^2}{2g} + h_1 \quad (2.18)$$

### II.6.5 Temps mis par la bille pour atteindre la hauteur maximale

Il définit le temps déduit de l'équation (2.16) de la vitesse  $v_{bd}$  lorsqu'elle s'annule, c'est-à-dire le temps maximal désigné par  $t_{pic}$  est:

$$t_{pic} = \frac{v_b}{g} + t_1 \quad (2.19)$$

Avec :

$t_1$  : Temps initial de lancement de la bille

### II.6.6 Vitesse de la jarre

La vitesse de la jarre qu'on désigne par  $v_v$ , elle est l'équation de la vitesse du piston au temps  $t = t_{pic}$ , c'est-à-dire que la vitesse de la jarre devient l'équation (2.20):

$$v_v = -r_v \omega_m \sin(\omega_m t_{pic}) - \frac{r_v^2 \omega_m \sin(2\omega_m t_{pic})}{2(l_b^2 - r_v^2 \sin^2(\omega_m t_{pic}))^{1/2}} \quad (2.20)$$

### II.6.7 Energie d'impact du broyeur mécanique

Une fois que la bille atteint la hauteur  $h_{pic}$ , elle tombe en chute libre comme montre la figure 2.6f.

La vitesse de la bille  $v_d$  et sa hauteur  $h_d$  par rapport à son mouvement de chute libre, peuvent être exprimées par:

$$v_d = -g(t - t_{pic}) \quad (2.21)$$

$$h_d = h_{pic} - \frac{1}{2}g(t - t_{pic})^2 \quad (2.22)$$

Dans cette position, la jarre et la bille se déplacent individuellement pour différentes configurations, le choc peut avoir lieu lorsque la différence de déplacement entre la bille à la hauteur  $h_d$  et le déplacement de la jarre à la course  $s_v$ , est égale à zéro.

Lors de la collision, la course de la jarre pourrait ne pas s'atteindre, car la jarre est fixée au mécanisme bielle-manivelle. En plus, le rebondissement de la bille dans la jarre est considéré nul, à cause de la poudre qui agit comme des couches viscoélastiques entre les surfaces de contact de la bille et la paroi interne de la jarre.

Ainsi, l'énergie d'impact est définie par [15].

$$E_i = \frac{1}{2} m (v_d - v_v)^2 \quad (2.23)$$

Or, dans la pratique de la technique de mécanosynthèse, le choc des billes entraîne généralement une perte d'énergie. D'où l'énergie d'impact de notre système de broyeur, désignée par  $E_{\text{mod}}$ , sera:

$$E_{\text{mod}} = k_0 E_i \quad (2.24)$$

Où,

- $k_0$  : Constante qui dépend des caractéristiques de la poudre, de la vitesse relative de la bille et le matériau caractérisant la dureté de cette dernière, cette constante est inférieure à 1.

### II.6.8 Energie cinétique de la la bille

L'énergie cinétique dépend de la vitesse de choc et de la msse. Comme le mouvement de la bille est supposé rectiligne et uniforme, la vitesse de lancement ou de choc  $v_c$  est égale à la vitesse de la bille lors de son mouvement.

La vitesse de choc  $v_c$  est toujours perpendiculaire à la surface de contact dans jarre. L'énergie cinétique de la bille est :

$$E_c = \frac{1}{2} m v_b^2 \quad (2.25)$$



### II.6.9 Fréquence de choc de la bille

La fréquence de choc représente le nombre de choc ou de collision par seconde. Ainsi, la connaissance de la trajectoire de la bille du point de lancement jusqu'au point de son impact et en plus de sa chute, est nécessaire pour le calcul de la fréquence de choc de la bille donnée dans l'équation (2.26).

$$f_c = \frac{1}{t_{pic} + t_{chute}} \quad (2.26)$$

Avec :

- $t_{chute}$ : Temps de chute de la bille après qu'elle atteint une hauteur maximale dans la jarre, dans le cas général, considéré égal au temps  $t_{pic}$ .

### II.6.10 Puissance de choc de la bille

La puissance de choc est donnée par :

$$P_c = \frac{\Delta E_c}{\Delta t} = f_c E_c = \frac{1}{t_{pic} + t_{chute}} \frac{1}{2} m v_b^2 \quad (2.27)$$

L'énergie cumulée de choc dissipée dans le matériau pendant une durée de broyage de la poudre est égale au produit de la puissance injectée (ou de choc) ci-dessus calculée par la durée de broyage.

## II.7 Application numérique aux équations de mouvements du système de broyeur

Les mouvements de la jarre et de la bille sont deux paramètres importants dans le choc mécanique de la bille pour le broyage de la poudre. Ainsi, à partir du modèle mathématique qu'on a adopté, l'énergie d'impact créée durant le choc peut augmenter que si la trajectoire de rebondissement de la bille est plus longue.

En outre, la hauteur  $h_{pic}$  définit dans l'équation (2.18) peut avoir un effet important sur l'énergie d'impact créée lors du choc mécanique de la bille.

En tenant compte des données du tableau 2.1 ci-dessus et, pour deux différentes vitesses de rotations de la manivelle, nous avons vérifié par calculs numériques ces équations décrites dans ce chapitre pour  $\omega_m = 900$  tr/min et  $\omega_m = 1050$  tr/min respectivement, et qui sont illustrés dans un tableau 2.2 comme suit.

Tableau II.2 : Applications numériques aux équations du mouvement du modèle de broyeur pour deux vitesses de rotation,  $\omega_m=900$  et 1050 tr/min.

Vitesse de rotation de la manivelle, $\omega_m$	<b>900 tr/min</b>	<b>1050 tr/min</b>
Angle de lancement de la bille, $\theta_1$	1.2654 rad 72.5064 °	1.2654 rad 72.5064 °
Vitesse de lancement de la bille, $v_b$	-2.6984 m/s	-3.1481 m/s
Temps initial de lancement de la bille, $t_1$	0.0134 s	0.0115 s
Hauteur initiale de lancement de la bille, $h_1$	0.0806 m	0.0806 m
Hauteur atteinte par la bille, $h_{pic}$	0.4447 m	0.5762 m
Temps de lancement de la bille, $t_{pic}$	0.2832 s	0.3263 s
Vitesse de la jarre, $v_v$	-1.003 m/s	0.1130 m/s
Energie cinétique de la bille, $E_c$	0.9760 J	1.3284 J
Fréquence de choc de la bille, $f_c$	1.7650 Hz	1.5322 Hz
Puissance de choc de la bille, $P_c$	1.7227 W	2.0355 W

### II.7.1 Trajectoire du mouvement de la bille et de la jarre

Les figures 2.6 et 2.7 montrent les déplacements de la jarre et de la bille en fonction du temps pour des vitesses de rotations de 900 et 1050 tr/min de la manivelle.

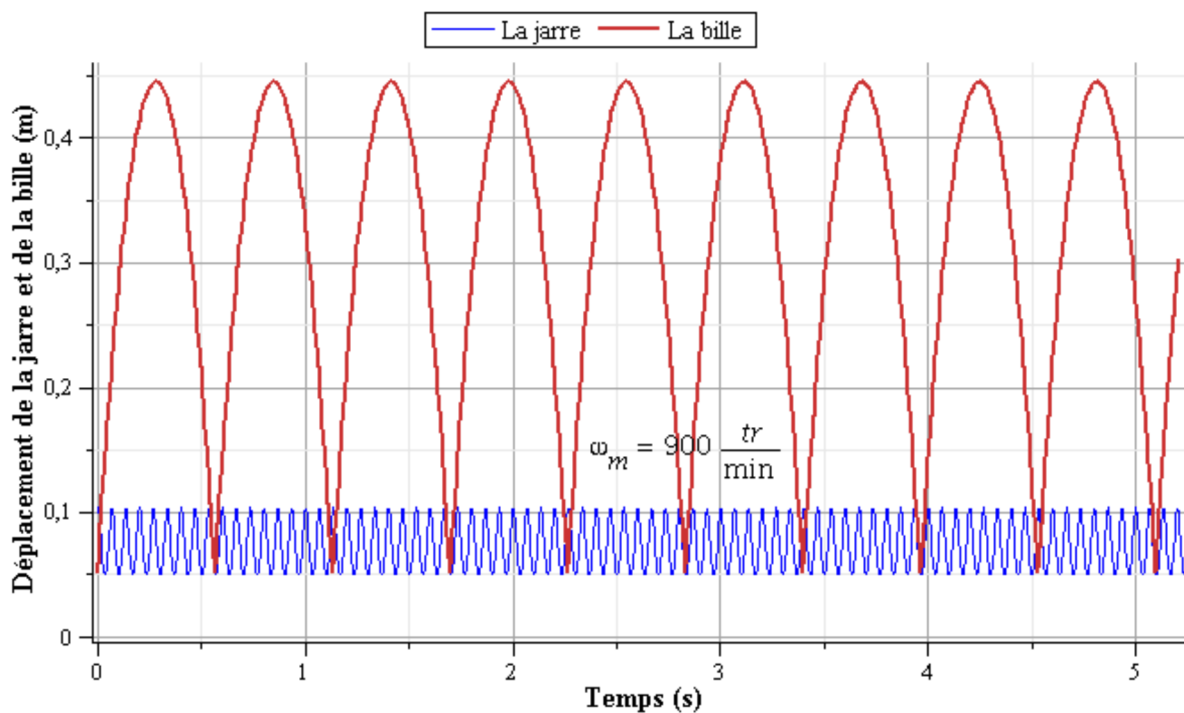


Figure II.8 : Déplacement de la jarre et de la bille en fonction du temps à la vitesse de rotation 900 tr/min.

Comme la jarre est fixée à l'extrémité supérieure du piston, le déplacement maximal de la jarre est égal au déplacement du piston à n'importe qu'elle vitesse angulaire de la manivelle.

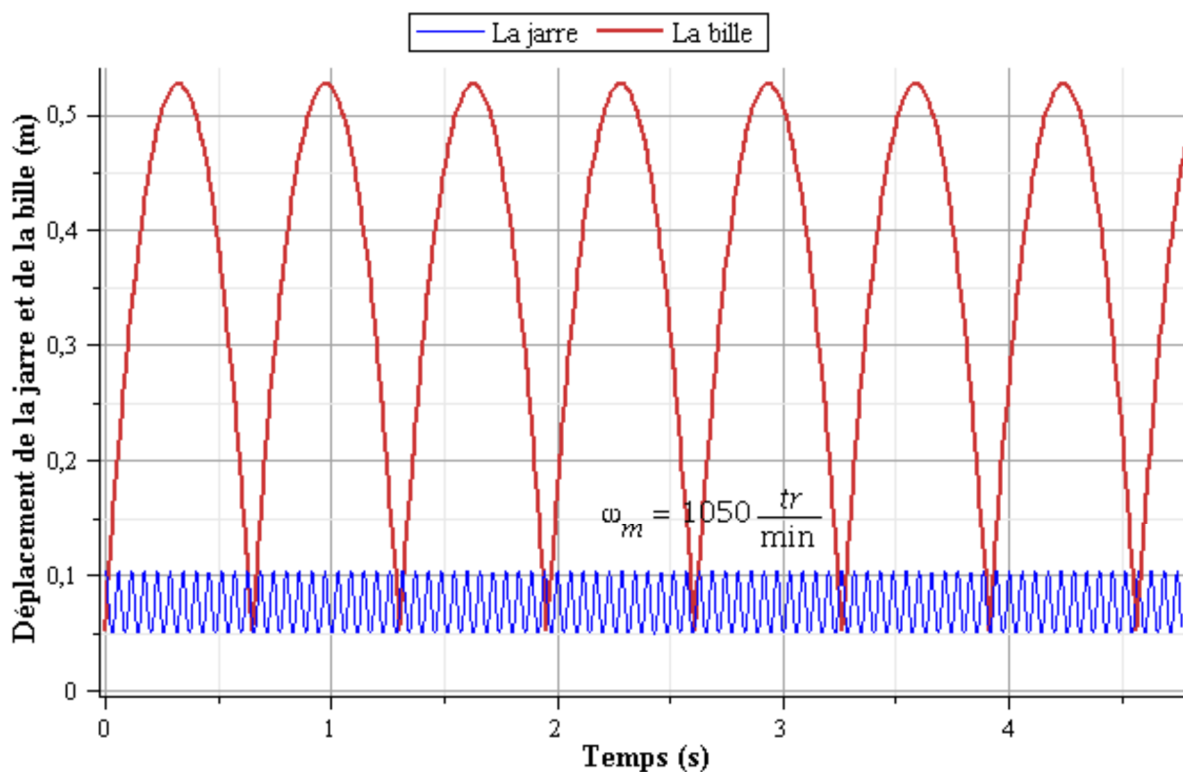


Figure II.9: Déplacement de la jarre et de la bille en fonction du temps à la vitesse de rotation 1050 tr/min.

## II.8 Modèle de conception du broyeur mécanique

Basé sur le modèle théorique et sur des calculs numériques, le design du système de broyage a été développé. La figure 2.8 montre une vue de deux faces d'un système de broyage mécanique dans lequel l'étude a été menée. Le système consiste à agiter une poudre et une bille, lesquelles sont contenues dans une enceinte étanche appelée la jarre.

Un mécanisme bielle-manivelle qui fait actionner le piston d'un mouvement vertical de translation alternatif qui, entraîne la jarre dans son mouvement et dans laquelle la charge de poudre et la bille sont contenues, de plus, il a été déjà signalé qu'un petit nombre de billes peut réduire la fréquence de collision, la situation peut s'améliorer par utilisation d'une seule bille de grand diamètre.

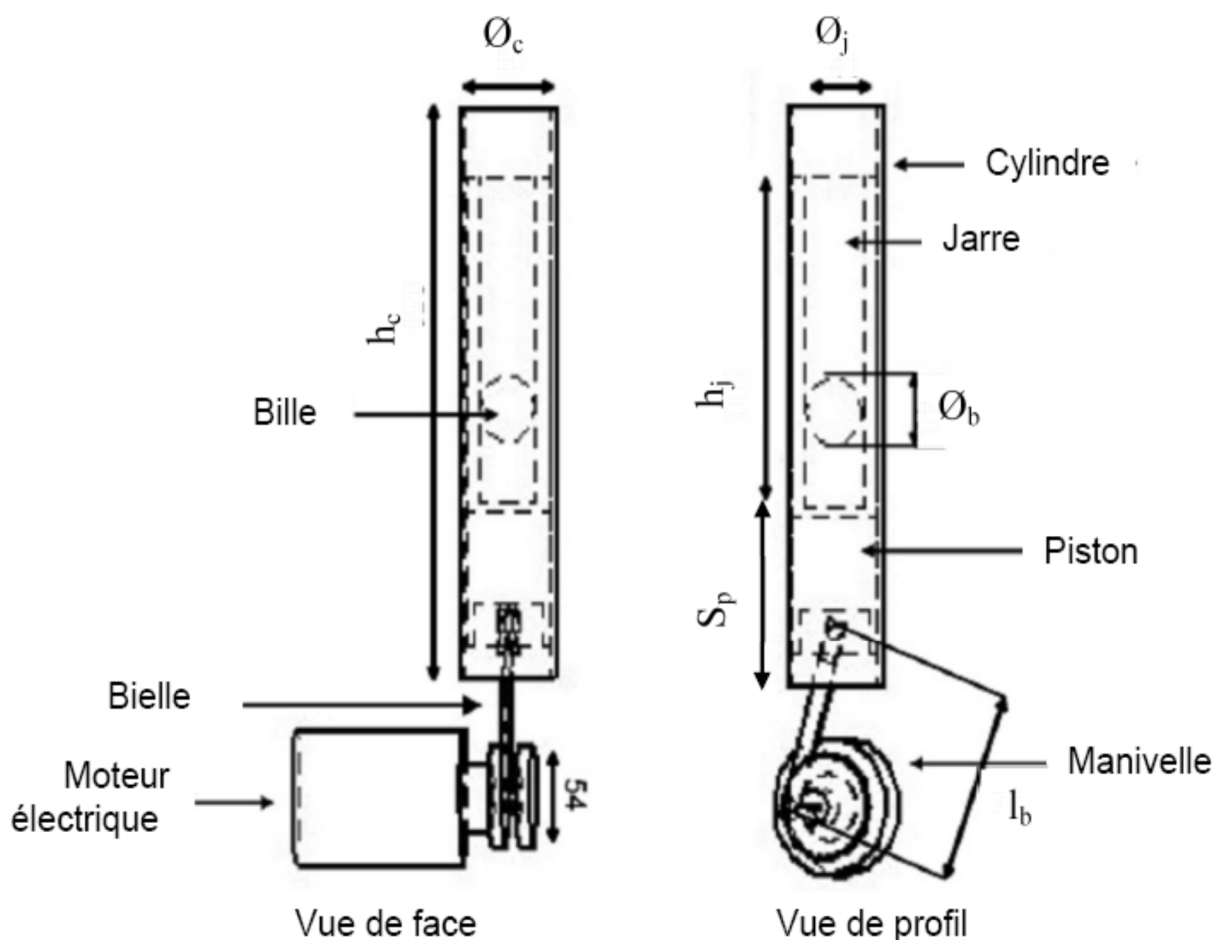


Figure II.10 : Schéma d'un broyeur mécanique de système bielle-manivelle.

Ce design est en corrélation avec plusieurs travaux de ceux de Riffel et Schilz [16] qui ont constaté que le temps de broyage a augmenté avec la diminution du nombre de billes. Les mêmes résultats ont été obtenus par Dutta et Pradhan [17] où la réduction de la taille des particules d'une poudre s'effectue par utilisation d'une seule bille, est beaucoup plus efficace que pour un broyage avec un grand nombre de billes.

D'autres travaux effectués par Huang et al, ont prouvé que des forces d'impacts plus importantes sont créées avec des billes de grands diamètres. De plus, Li et Man [18] ont démontré que l'énergie d'impact augmente proportionnellement avec le diamètre des billes.

# **Chapitre III :**

**Aspect énergétique et  
modélisation en  
mécanosynthèse**

## Chapitre III

# Aspect énergétique et modélisation en mécanosynthèse

### III.1 Introduction

Le transfert d'énergie dans le procédé de mécanosynthèse est à l'origine d'un échauffement thermique à l'intérieur du broyeur mécanique en mode de fonctionnement, et dans lequel la charge de poudre et la bille sont en mouvement d'agitation. Donc, le broyeur est un dispositif qui crée et transfère l'énergie sous forme de chaleur à la charge de poudre grâce au choc des billes en mouvement de broyage.

En plus, c'est le mécanisme de transfert d'énergie où la poudre est piégée entre les billes en collision ou encore celle-ci est prise entre la bille et la paroi de la jarre. Par exemple, dans un broyeur attriteur le transfert d'énergie est principalement dû au mouvement de choc des billes où les particules de poudre sont prises en collisions.

En revanche, dans le cas du broyeur vibrant ou planétaire, le transfert d'énergie est dû au choc des billes avec la charge de poudre et contre la paroi interne de la jarre du broyeur planétaire, ou la paroi de l'enceinte appelée la cellule du broyeur vibratoire.

Pour l'examen du transfert d'énergie au cours du processus de mécanosynthèse, nous considérons le principe fondamental suivant. Qu'est-ce qui se passe quand une bille tombe en chute libre d'une certaine hauteur ( $h$ ) sur une surface plane de même nature que celle de la bille? La bille va par la suite subir des rebondissements pour une hauteur ( $h'$ ), où on définit ainsi un taux de rebondissement selon l'équation suivante :

$$\eta_b = \frac{h'}{h} \quad (3.1)$$

La figure 3.1 donne une courbe qui montre que l'énergie cinétique de la bille est égale à son énergie potentielle où celle-ci dépend du rapport de rebondissement de l'équation (3.1). Ce rapport varie en général de 0,9 à 0,65 en fonction de l'augmentation de l'énergie d'impact [16]. Ainsi, l'énergie dissipée par effet de joule durant l'impact  $E_d$  est donnée par :

$$E_d = (1 - \eta_d)E_b \quad (3.2)$$

Avec :

$E_b$  : L'énergie cinétique de la bille

D'autre part, l'énergie dissipée sera transformée sous forme de chaleur, ce qui résulte à une augmentation de la température de la bille ainsi que de la paroi interne de l'enceinte de broyage.

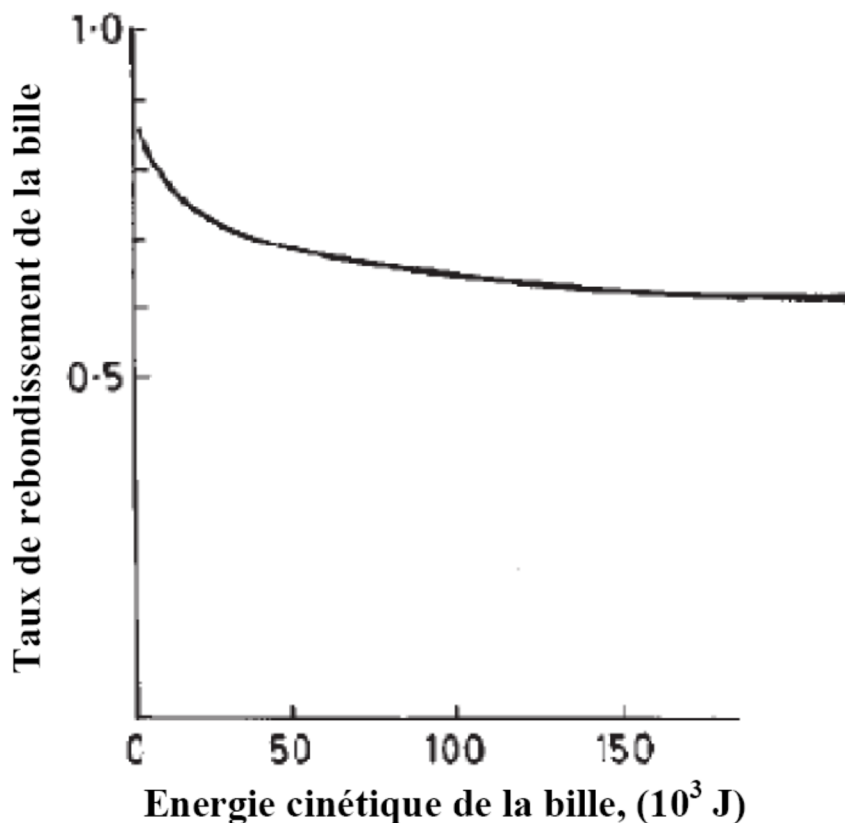


Figure III.1 : le rapport de rebondissement de la bille  $\eta_b$  en fonction



### III.2 Modélisation du processus de broyage

La modélisation de la technique de mécanosynthèse peut simplement être définie comme une représentation d'un phénomène physique en vue d'obtenir un meilleur aperçu sur le comportement du processus de broyage. Les modèles développés pour des processus complexes ne peuvent pas s'attendre à des résultats précis. Au contraire, ces modèles sont conçus pour identifier tout les paramètres pouvant avoir une influence dans la procédé de broyage, ils peuvent également prédire pour des résultats meilleurs.

Un résultat utile est obtenu d'une telle modélisation du processus de broyage, implique une utilisation moindre des formules empiriques nécessaires afin d'améliore le processus à des outils d'ingénierie plus utile.

Certains aspects concernant ce qui se passe durant le processus de la mécanosynthèse ont été connus qualitativement pendant un certain temps, mais la description du processus est complexe, ce qui nécessite des notions sur les lois de la mécanique et du transfert thermique ainsi que sur la thermodynamique et cinétique.

En dépit de cela, la modélisation de la mécanosynthèse a été un moyen de grand intérêt pour une meilleure compréhension du procès de broyage.

Bien que les modèles de MA sont au stade précoce de développement, divers modèles physiques / théorique développés peuvent être subdivisés en mécaniste, atomistique, thermodynamique et cinétique. Les modèles mécanistes traitent la déformation, la coalescence et la fracturation des particules de poudre, ainsi que l'aspect dynamique de la bille à l'intérieur de l'appareil de broyage. Modèles atomiques permettent une compréhension plus profonde de la formation des phases non-équilibrées à l'aide de la méthode de CALPHAD des données thermodynamiques et des calculs des diagrammes de phases.

Les modèles mécanistiques peuvent être classés en deux types de modélisation, à savoir : une modélisation locale et une modélisation globale.

- Modélisation locale décrit l'effet thermique et l'aspect mécanique du processus de broyage, en plus le phénomène répétitif qui a lieu, de déformation, de fracture et de

soudure des particules de poudre qui se trouvent piégées entre les billes en mouvement de choc, en plus, la modélisation locale dépend des paramètres de broyage qui sont : la vitesse de choc de la bille, l'angle d'impact, le rapport RBP (masse billes sur masse de poudre), etc.. qui peuvent avoir une influence dans la technique de mécanosynthèse.

- Modélisation globale spécifie l'appareil de broyage. Ce type de modélisation implique l'étude de l'hétérogénéité de la distribution de la charge poudre dans le broyeur, ainsi que l'angle d'impact au cours du broyage mécanique.

### **III.2.1 Modèles de transfert d'énergie locale dans le processus de mécanosynthèse**

Dans le but de simuler l'évolution du processus de broyage, certains auteurs [19] ont proposé des modèles de broyage, ils estiment que le choc de la bille peut se produire sous différents angles d'impact à l'intérieur de l'enceinte de broyage, et cette particularité géométrique pourrait avoir un effet avantageux sur les tendances relatives à la coalescence et la fragmentation de la poudre.

Par exemple, plusieurs types de fracture de la poudre peuvent dépendre, de l'angle d'impact de la bille, sa vitesse de choc normal, ainsi que des forces de frottements et de cisaillement, etc...

Les particules de poudres piégées entre les billes en collision subissent une déformation plastique sévère, qui les aplatit. Sous l'effet cumulatif de broyage des billes, les particules de poudre de distribution de façon uniforme sur la surface de la bille deviennent plus fines, conduisant à de nouvelles zones de surface.

Au cours de la collision, il y'a création de deux forces qui sont : la force normale ( $F_n$ ) et la force tangentielle ( $F_t$ ) [20], comme indiqué dans la Figure 3.2. La théorie hertzienne d'impact s'applique si la dissipation de l'énergie cinétique associée avec le mouvement relatif des corps en collision est beaucoup moins que la teneur en énergie élastique des organes.

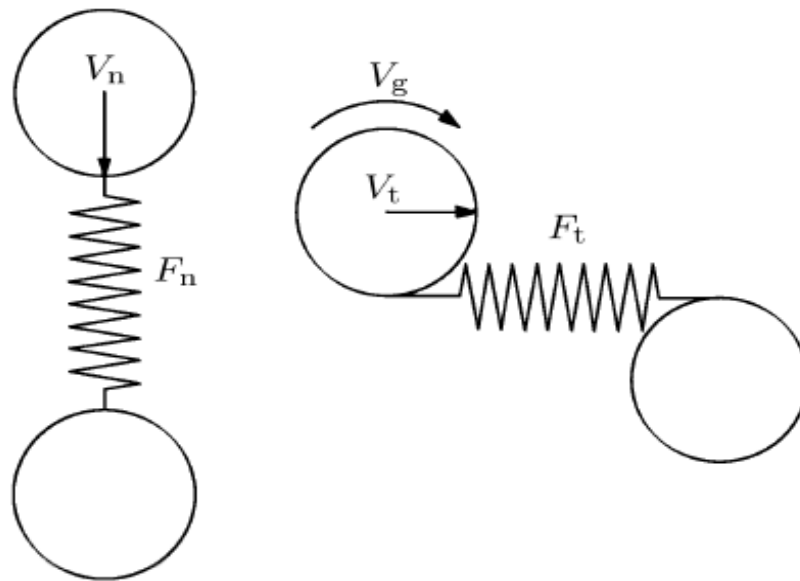


Figure III.2 : Forces exercées lors du choc mécanique des billes (a) force de collision normale et (b) force de cisaillement [20].

D'autre part, la vitesse relative des billes de broyage est très inférieure à la vitesse du son dans le matériau, qui répond à la condition ci-dessus [20, 21]. Finalement, nous pouvons conclure que: les collisions sont parfaitement élastique, sans perte d'énergie, la compression progressive des billes de broyage, où l'énergie cinétique se transforme en énergie élastique stockée, et puisque le rayon d'Hertz (HR) est beaucoup plus petit que le rayon de la bille de broyage, la surface de broyage du choc des billes peut être supposée plate, comme représenté dans la Figure 3.3

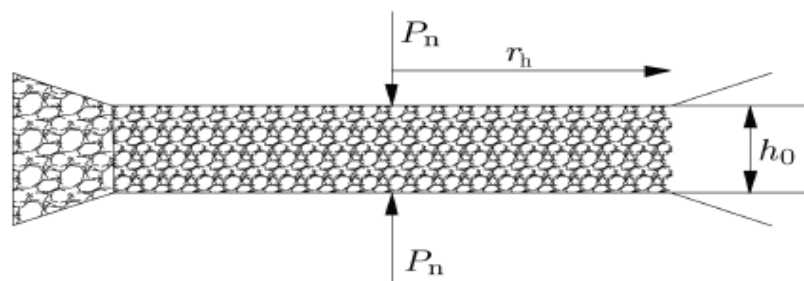


Figure III.3 : La surface de contact d'impact des billes de broyage [19].

La théorie Hertzienne appliquée à des collisions se produisent pendant le traitement mécano-chimique (MC) du processus de broyage. Ainsi, le temps d'impact ( $\tau$ ), le rayon de la surface d'impact ( $r_h$ ), l'épaisseur ( $h_0$ ) de la poudre compacte supposée un disque, la pression d'impact normal ( $P_n$ ), ainsi que la force normale d'impact ( $F_n$ ) peuvent être données comme suit :

$$\tau = g_\tau v_b^{-0.2} \left( \frac{\rho_b}{E} \right)^{0.4} R_b \quad (3.3)$$

$$r_h = g_r v_b^{0.4} \left( \frac{\rho_b}{E} \right)^{0.2} R_b \quad (3.4)$$

$$h_0 = \left[ 16(h_j - 2R_b) \frac{\rho_b}{3\rho_p C_R} \right] \left[ \frac{n_b R_b^3}{(3h_j D_j^2 - 16n_b R_b)} \right] \quad (3.5)$$

$$P_n = g_p v_b^{0.4} \left( \frac{\rho_b}{E} \right)^{0.2} E \quad (3.6)$$

$$F_n = P_n \pi r_h^2 \quad (3.7)$$

Avec :

- $g_\tau$ ,  $g_r$ , et  $g_p$  : Sont des coefficients qui dépendent de la géométrie de collision. Leurs valeurs sont indiquées dans le tableau 1 ;
- $v_b$  : Vitesse de choc de la bille ;
- $\rho_b$  : Masse volumique de la bille ;
- $E$  : Module d'Young de la bille ;
- $r_h$  : Rayon de la surface d'impact ;
- $R_b$  : Rayon de la bille ;
- $D_j$  : Diamètre de la jarre ;
- $h_j$  : Hauteur de la jarre ;
- $n_b$  : Nombre de billes ;

- $\rho_p$  : Masse volumique de la poudre ;
- $C_R$  : Rapport de la masse des billes sur la masse de poudre.

Tableau III.1: Constantes géométriques pour différentes configurations de broyage, pour les surfaces courbées avec un rayon de courbure négatif  $-R_j$ ,  $\chi$  est défini comme  $-R_j/R_b$  [21].

Type de collision	$g_\tau$	$g_r$	$g_p$
Bille-bille	5.5744	0.9731	0.4646
Bille-surface plane	6.4034	1.4750	0.3521
Bille-surface courbée	$6.4034[(\chi - 1)/\chi]^{0.2}$	$1.4750[\chi/(\chi - 1)]^{0.4}$	$0.3521[(\chi - 1)/\chi]^{0.6}$

Or, dans notre cas du broyeur mécanique de système bielle-manivelle où une seule grande bille est utilisée dans la jarre pour le broyage de la poudre, nous adoptons le modèle de collision de la bille avec la surface plane.

La figure 3.4 représente schématiquement la prise de la poudre compacte entre la bille et la paroi pendant la collision [22,23].

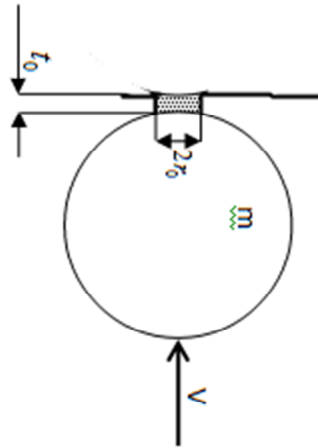


Figure III.4 : Représentation schématique de la prise de la poudre compacte entre la bille et la paroi pendant la collision [22].

D'après cette figure, la poudre compacte est supposée un disque d'épaisseur  $t_0$  et de rayon  $r_0$  [24].

Ce rayon peut être considéré comme le rayon de la surface de contact de la bille et de la paroi qui sont en collision élastique. Ainsi, certains auteurs assurent que l'épaisseur de la poudre compactée  $t_0$  diminue, lorsque son diamètre augmente selon la loi [23] :

$$t_0 = \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (3.8)$$

Avec :

- $k$  : Une constante ;
- $D = 2r_0$  : Diamètre de la poudre compacte, m.

Cette approche se réfère à une approximation d'un disque mince.

### III.2.2 Contraintes élastiques d'impact créées

La figure 3.3 montre une géométrie de collision à la compression maximale d'impact d'une bille sur une plaque plane ayant un rayon de courbure infini et une masse supposée assez grande que celle de la bille.

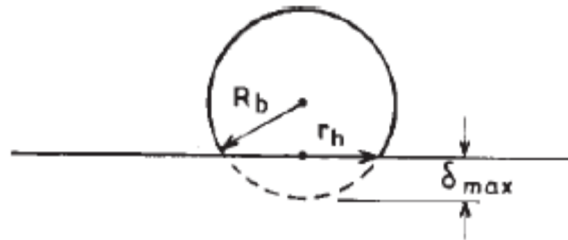


Figure III.5: Une géométrie de collision à la compression maximale de la bille avec la surface plane.

La bille subit une compression à la distance  $\delta_{max}$ , celle-ci peut être exprimée en termes des caractéristiques du matériau dont il dépend des paramètres de broyage, ainsi que du type de broyeur mécanique, cette distance est donnée par l'équation (3.9).

$$\delta_{max} = \frac{r_0^2}{2R_b} \quad (3.9)$$

Par conséquent, le volume de déformation engendré par la collision de la bille est défini par l'équation :

$$V_{def} = \frac{2\pi R_b^2 \delta_{max}}{3} \quad (3.10)$$

En outre, l'énergie élastique de déformation par unité de volume peut être exprimée par :

$$E_e = \frac{P_n^2}{2E} \quad (3.11)$$

Ainsi, l'énergie élastique d'impact est égale à :

$$E_{ei} = \frac{\pi P_n^2 R_b^2 \delta_{\max}}{6E} \quad (3.12)$$

Et, la puissance élastique effective par impact est donnée par:

$$E_{ei} = fE_{ei} \quad (3.13)$$

Où :

- $f$ : C'est la fréquence de choc de la bille.

Le tableau 3.2 ci-dessous donne des valeurs calculées pour certaines équations définies ci-dessus (le rayon de la bille, temps d'impact, rayon d'impact et la pression normale), et selon la théorie hertzienne d'impact. Afin de comparer ces résultats tabulés avec les notre donnés sous forme de graphes dans le chapitre 4.

Tableau III.2: Caractéristiques des contacts Hertiens pour différents broyeurs [25].

Broyeur	Matériau	$R_b$ ( $10^{-3}$ m)	$2\tau$ ( $10^{-5}$ s)	$r_h$ ( $10^{-4}$ m)	$P_{\max}$ ( $10^9$ N/m <sup>2</sup> )
Attriteur (bille-bille)	Acier inoxydable	2.4	1.62	0.59	2.47
	Acier au tungstène	2.4	1.38	0.55	5.80
SPEX (bille-surface plane)	Acier inoxydable	2.4	1.25	1.99	4.16
	Acier au carbure de tungstène	5.6	3.12	4.81	6.18
SPEX (bille-surface courbée)	Acier inoxydable	6.4	3.08	6.20	3.30
	Acier inoxydable	2.4	1.22	2.10	3.85



### III.3 Temps de broyage

Etant donné que les particules de poudre sont plus petites que lorsqu'elles se trouvent piégées entre les billes en collision, il est évident de considérer que les surfaces de contact sont très légèrement curviligne par rapport à la poudre compacte. Mais, la poudre compacte est supposée, par la suite, un cylindre plein ayant une base plane [26].

Le volume de déformation par unité de temps de la poudre compacte est, calculé selon la formule ci-dessous :

$$v_p = \frac{\varepsilon \pi r_h^2 h_0}{t_c} \quad (3.14)$$

Où :

$\varepsilon$ : Contrainte de déformation

Le temps de broyage  $t_p$  est le produit du volume total de la poudre  $V_p$  et la contrainte critique de déformation divisé par, le volume de déformation par impact ainsi que sa contrainte  $\varepsilon$ , qui est définit par :

$$t_p = \frac{V_p \varepsilon_c t_c}{\varepsilon \pi r_h^2 h_0} \quad (3.15)$$

Le volume  $V_p$  est déterminé expérimentalement selon les conditions de broyage, et la contrainte  $\varepsilon_c$  est calculée empiriquement et elle varie de 3 à 5 selon un certains nombres de collisions de la bille, correspondant à une structure laminaire qui initialement égale à 20  $\mu\text{m}$  et peut atteindre la taille de 1 à 0.1  $\mu\text{m}$ .

En plus, pour estimer le temps entre une collision, une formule est donnée par l'équation (3.16) :

$$t_c = \frac{\lambda}{v_b} \quad (3.16)$$

Tel que :

$\lambda$ : Distance entre la première et la deuxième collision ;

$v_b$ : Vitesse de collision de la bille.

# **Chapitre IV :**

## **Résultats et discussion**

# CHAPITRE 4

## RESULTATS ET DISCUSSION

### IV.1 Introduction

Notre travail consiste à élaborer un programme qui permettra de calculer les forces énergétiques et élastiques qui peuvent avoir lieu lors de l'impact de la bille avec la surface de contact à l'intérieur de la jarre de notre broyeur mécanique de système bielle manivelle , et ce durant le procédé de mécanosynthèse, en utilisant les équations développées dans les chapitres précédents, et cela en faisant varier les paramètres suivants:

- Le rayon de la manivelle;
- La longueur de la bielle;
- La vitesse de rotation de la manivelle.

En plus, nous avons, pour une vitesse de rotation donnée du moteur, dimensionné le broyeur mécanique de système bielle-manivelle où nous avons des cotations qui correspondent à plusieurs dimensions du type géométrique lesquelles influent les forces dynamiques créées dans le broyeur, à savoir:

- La hauteur de la jarre;
- Le diamètre de la bille;
- La longueur du cylindre;
- Le diamètre du cylindre;
- Le diamètre de la jarre.

## IV.2 Programme de calcul

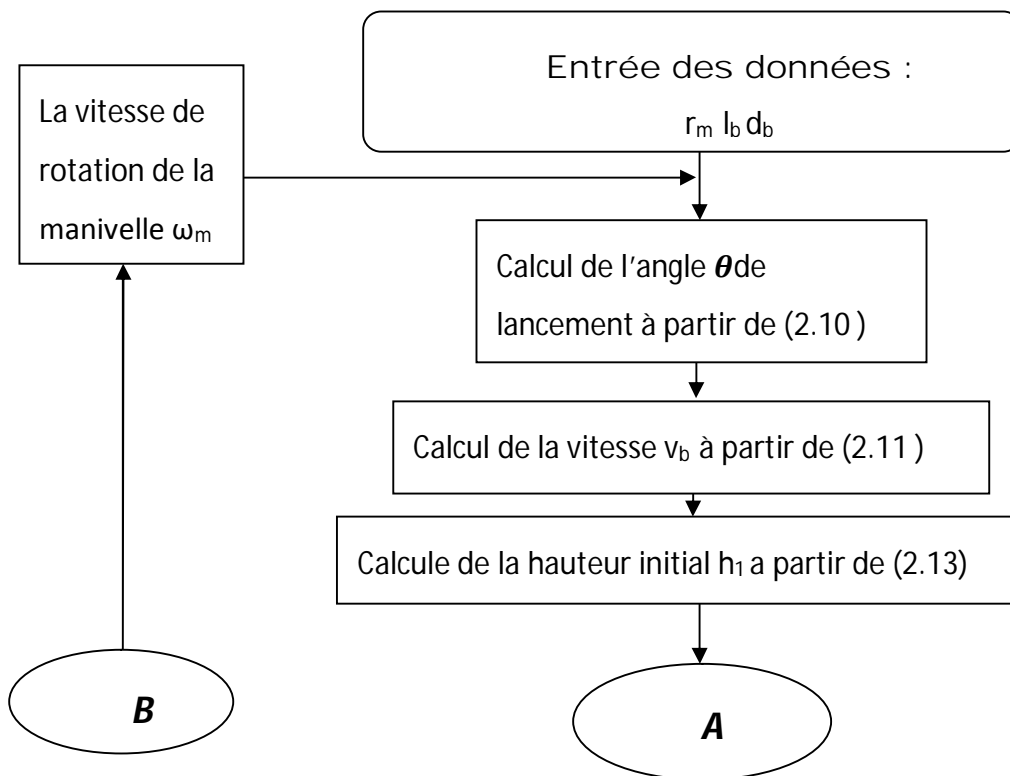
En utilisant le langage Fortran, un programme de calcul a été élaboré, ce dernier est basé sur la variation des différents paramètres et particulièrement la vitesse de rotation du moteur électrique, qui ont une influence sur ces forces énergétiques et élastiques.

Ce programme est régi par plusieurs étapes à savoir :

- Introduction des données constantes ;
- Une boucle de variation des différents paramètres cités auparavant ;
- Calcul de l'angle de lancement de la bille pour le calcul de sa vitesse;
- Calcul de la vitesse de choc de la bille;
- Calcul des forces énergétiques et plastiques ;
- Affichage des résultats.

## IV.3 Organigramme de calcul

Le programme élaboré peut être schématisé par l'organigramme ci-dessous:



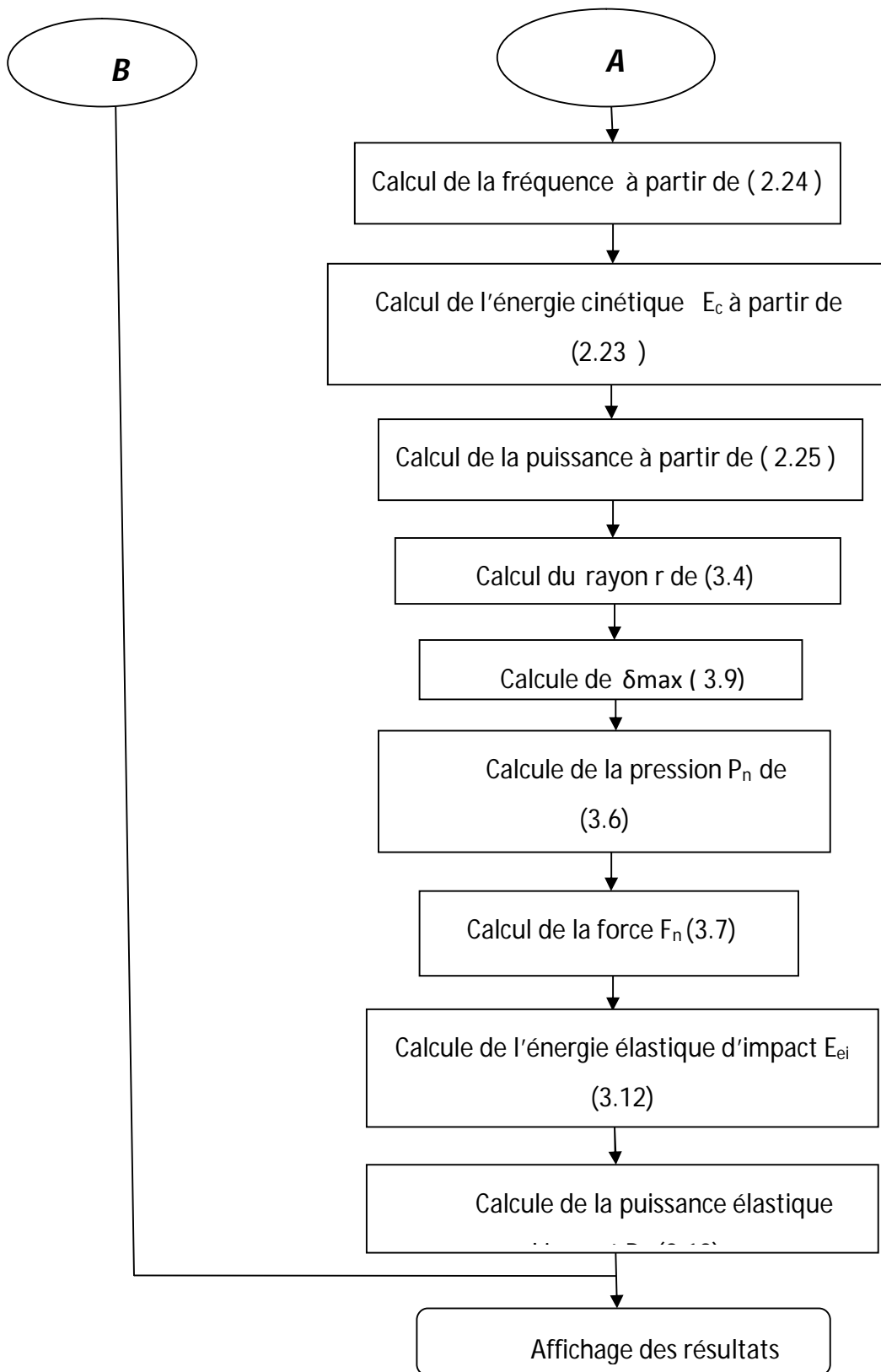


Figure : IV.1: Schéma de calcul des forces énergétiques et plastiques à l'intérieur de la jarre du broyeur mécanique de système bielle-manivelle.

#### IV.4 Energie cinétique de la bille

L'énergie cinétique de la bille ainsi que sa vitesse varient en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle, comme il est représenté dans la figure 4.2 et sachant que :

- La longueur de la bielle,  $l_b=77$  mm;
- Le rayon de la manivelle,  $r_m=27$  mm;
- Le diamètre de la bille,  $d_b= 30 ; 40$  et  $50$  mm;
- L'angle de lancement de la bille,  $\theta_1=1.2654$  rad ;  $\theta_1=72.5064^\circ$ .

D'après cette figure, nous remarquons que les courbes de l'énergie cinétique et de la vitesse de choc de la bille sont proportionnelles à la vitesse de rotation de la manivelle. En effet, la vitesse de choc de la bille dépend de cette dernière, ce qui résulte d'une augmentation de l'énergie cinétique de la bille. En plus, l'énergie cinétique est liée à l'augmentation de la masse de la bille ( $\varnothing 50$  mm) où le choix du matériau est l'acier dur inoxydable. Les résultats obtenus de la variation de l'énergie cinétique sont en comparaison avec ceux de l'auteur C. Suryanarayana [27].

D'autre part, la différence d'énergie cinétique  $\Delta E$  avant et après le choc ne peut être dissipée entièrement dans le matériau, sous forme de défauts, une dissipation d'énergie par effet de joule est à considérer au niveau de la surface de la bille. C'est pour cette raison, qu'on assiste à des élévations de températures locales dans l'enceinte de broyage qui est la jarre dans notre cas où, ce phénomène est habituellement connue par le processus mécanique d'élaboration des nanomatériaux.

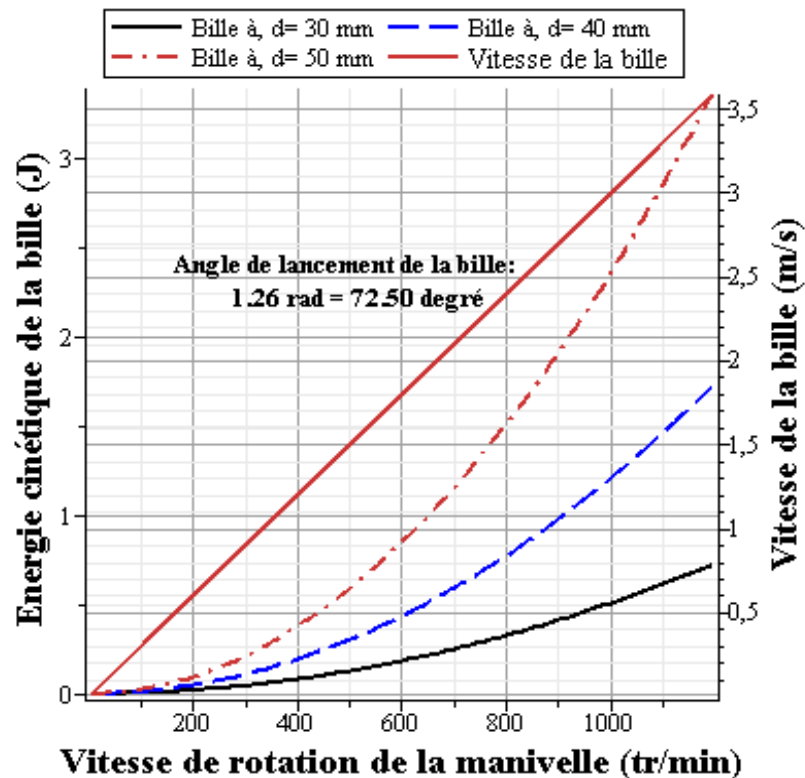


Figure IV.2: Energie cinétique de la bille et sa vitesse en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille,  $d=30$  ;  $40$  et  $50$  mm.

#### IV.5. Puissance de choc de la bille

La figure 4.3 représente la puissance de choc de la bille et sa fréquence en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle du broyeur mécanique où nous avons pris les données suivantes:

- Longueur de la bielle,  $l_b=77$  mm;
- Rayon de la manivelle,  $r_m=27$  mm;
- Diamètre de la bille,  $d_b= 30$  ;  $40$  et  $50$  mm;
- Angle de lancement de la bille,  $\theta_1=1.2654$  rad ;  $\theta_1=72.5064^\circ$ .

D'après les courbes de cette figure, nous remarquons que la puissance de choc de la bille augmente en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle, elle est plus importante lorsque le diamètre de la bille est plus grand. En outre, cette puissance représente le rapport d'un travail fourni qui est l'énergie cinétique de la bille et le temps mis pour qu'elle atteigne une hauteur maximale dans la jarre ainsi que le temps de sa chute



libre, et ce selon la variation de la vitesse de rotation de la manivelle comme il est illustré dans la figure 4.4.

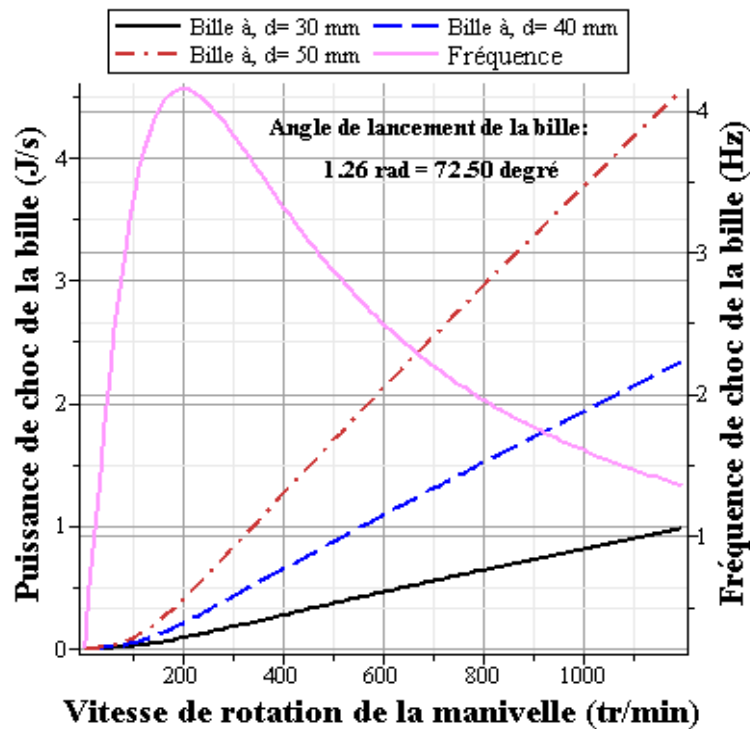


Figure IV.3: Puissance de choc de la bille et sa fréquence en fonction de la vitesse de

D'autre part, ce temps parcouru par la bille définit toutefois la fréquence de choc qui est égale à l'inverse du temps de lancement et du temps de chute de la bille, où l'allure de la courbe est représentée dans la figure 4.3. La courbe atteint un maximum égal à 4.7 Hz pour une faible vitesse de rotation de la manivelle égale à 200 tr/min, en revanche elle devient minimale pour 1.3 Hz quand la vitesse de rotation est plus grande et est égale à 1200 tr/min, par conséquent, une puissance de choc plus importante créée par la bille.

Or, dans le procédé de mécanosynthèse les auteurs Abdellaoui et al [28] estiment que la puissance de choc est défini comme étant un paramètre de contrôle du broyage de la poudre et, que l'on évalue généralement en terme d'une quantité d'énergie en joule (ou en calorie) par choc de la bille et par gramme de poudre nécessaire, en vue de l'élaboration d'un nouvel alliage de poudre de taille nanométrique. Les résultats obtenus aux calculs de la

puissance de choc pour notre cas du broyeur mécanique, sont en corrélation avec ceux donnés par l'auteur C. Suryanarayana [27].

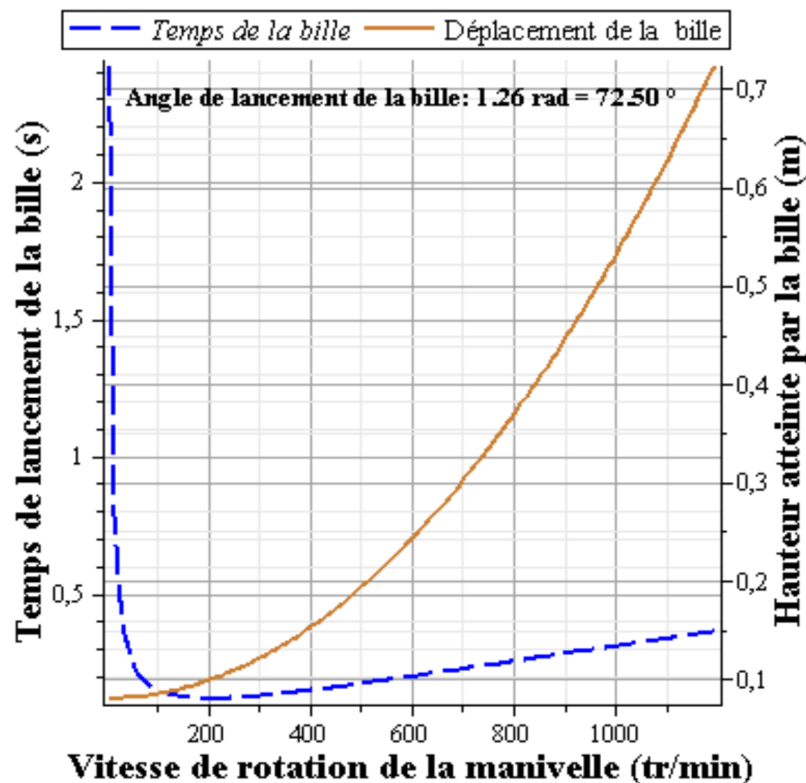


Figure IV.4: Temps de lancement de la bille et sa hauteur atteinte dans la jarre en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle.

#### IV.6 Force et pression d'impact de la bille

Afin d'estimer la force d'impact de la bille avec la surface de contact, nous avons tout d'abord représenté dans les figures 4.5 et 4.6 la variation du rayon et de la surface de contact qui sont produites par le choc de la bille soumise à la vitesse linéaire qui heurte la paroi plane de la jarre, et ce en fonction de la variation de la vitesse de rotation de la manivelle qui est entraînée par un moteur électrique, sachant que:

- La longueur de la bielle,  $l_b=77$  mm;
- Le rayon de la manivelle,  $r_m=27$  mm;
- Le diamètre de la bille,  $d_b= 30 ; 40$  et  $50$  mm;
- L'angle de lancement de la bille,  $\theta_1=1.2654$  rad ;  $\theta_1=72.5064^\circ$ .

L'analyse des courbes de cette figure montre que le rayon et la surface de contact augmentent en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle, et beaucoup plus avec l'augmentation du diamètre de la bille, par exemple pour un diamètre de  $\varnothing 50$  et une vitesse de rotation  $\omega = 1200$  tr/min on obtient la formation d'une surface  $S_0 = 13$  mm<sup>2</sup> qui a pour rayon  $r_0 = 2.034$  mm.

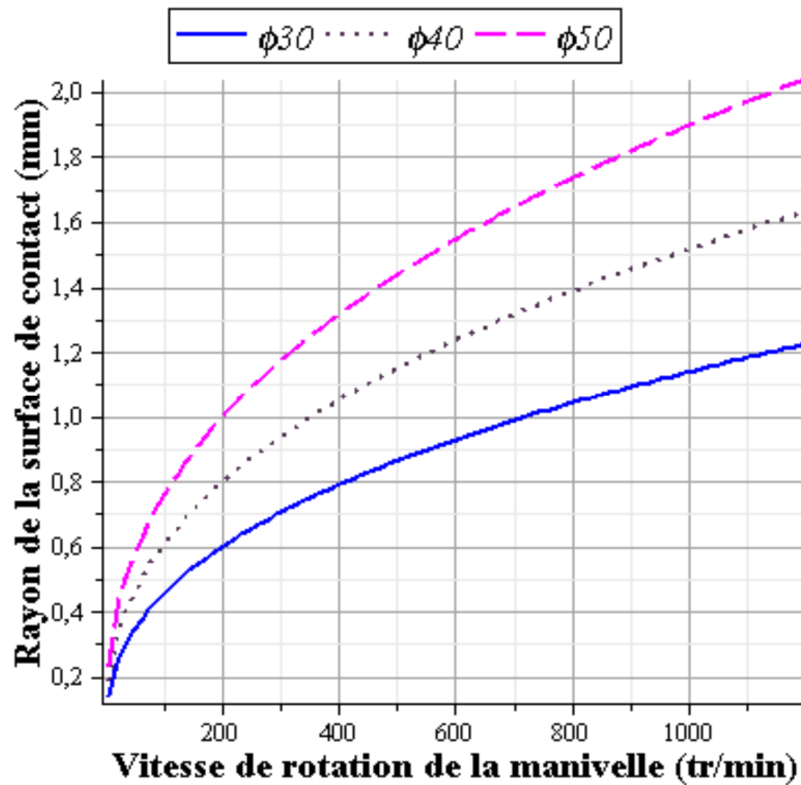


Figure IV.5: Rayon de contact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille,  $d = 30$  ; 40 et 50 mm.

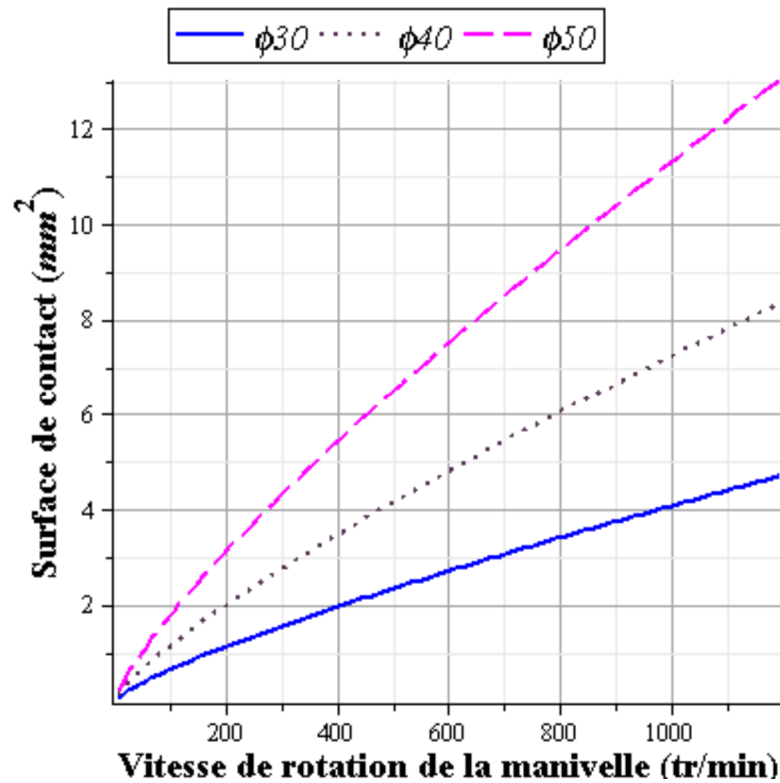


Figure IV.6: Surface de contact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille,  $d=30$  ; 40 et 50 mm.

Parallèlement, les courbes de la force et de la pression représentées dans la figure 4.7 montrent qu'elles augmentent en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle, aussi elles sont plus importantes au fur et à mesure que le diamètre de la bille augmente, ainsi elles peuvent atteindre des valeurs maximales de 50 KN et 4 GPa respectivement pour une force d'impact et une pression exercée sur la surface de contact donnée ci-dessus. D'autre part, les résultats obtenus pour le cas de notre broyeur mécanique sont comparés avec ceux donnés dans le tableau 2 du chapitre 3.

Du point de vue aspect de macanosynthèse, la force d'impact représente une intensité efficace du broyage qui est proportionnelle au dommage en terme, de déformation de la poudre créée par le choc de la bille qui favorise une pression d'impact nécessaire à la fragmentation des particules de poudre. Ce phénomène est accompagné d'une élévation de la température locale due au travail adiabatique de déformation convertie en énergie calorifique.

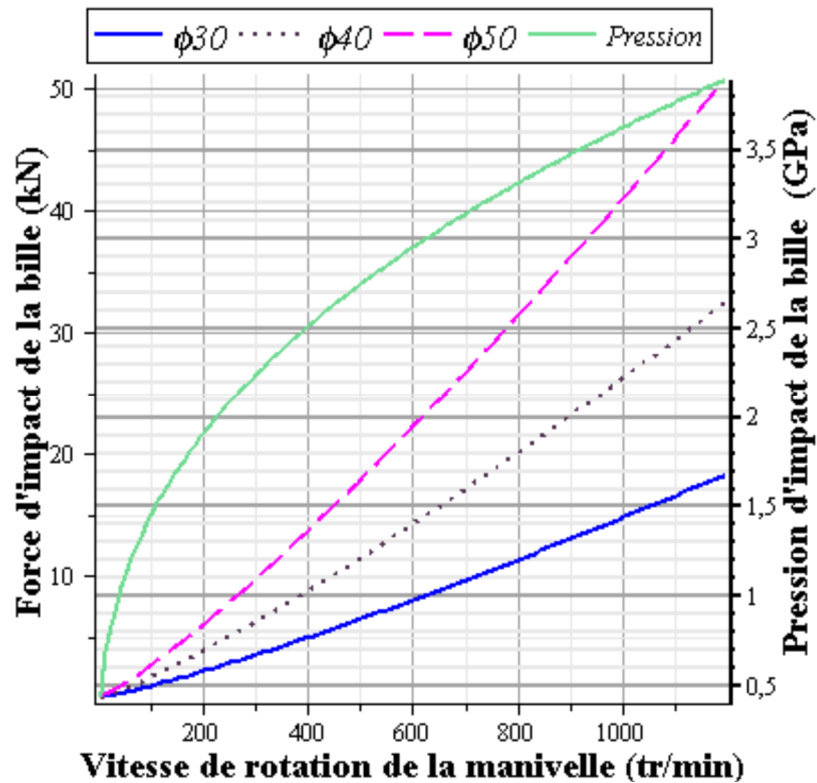


Figure IV.7: Force et pression d'impact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille,  $d=30$  ;  $40$  et  $50$  mm.

#### IV.7 Energie et puissance élastiques de choc

Pour pouvoir calculer l'énergie élastique et la puissance élastique lors de l'impact de la bille avec la paroi de la jarre du broyeur mécanique, nous avons en premier lieu évalué la distance maximale de déformation que la bille subie avec la surface plane, en faisant varier la vitesse de rotation de la manivelle pour différents diamètres de la bille ( $\phi 30$  ;  $\phi 40$  et  $\phi 50$ ) comme montre la figure 4.8, sachant que nous avons initialement pris les mêmes données de types géométriques.

Nous remarquons d'après les courbes de cette figure, qu'elles sont croissantes en fonction de la variation de la vitesse de rotation de la manivelle, mais aussi proportionnelles avec le diamètre de la bille. Pour une vitesse de rotation,  $\omega=1200$  tr/min, on obtient une distance maximale de déformation,  $\delta_{\max}=0.083$  mm pour un diamètre de la bille,  $d=50$  mm.

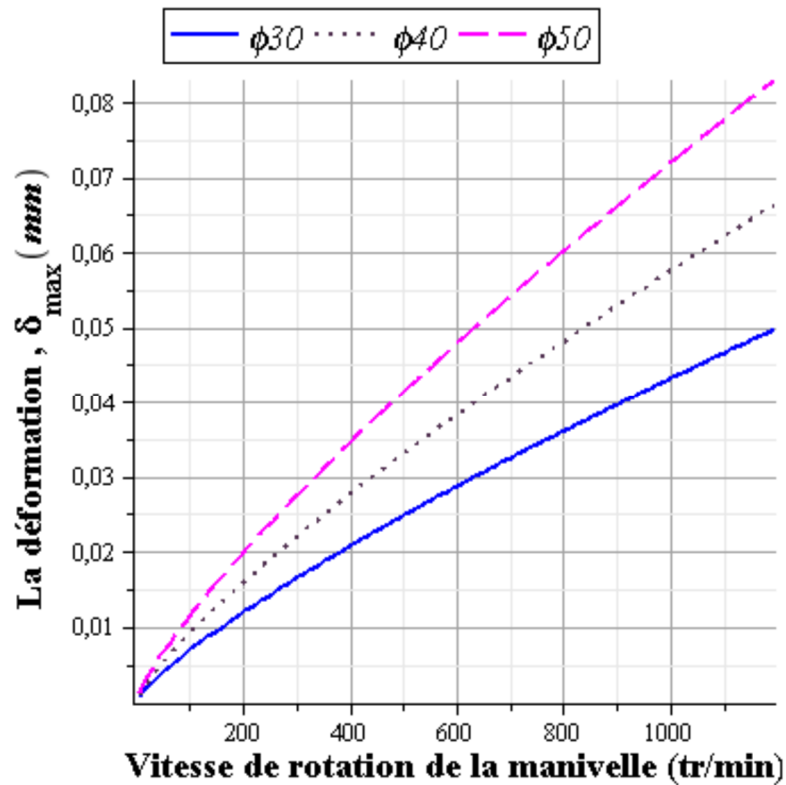


Figure IV.8: Déformation verticale produite par la bille lors de l'impact avec la surface plane en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle et pour des diamètres de la bille,  $d=30$  ; 40 et 50 mm.

Les figures 4.9 et 4.10 représentent la variation de l'énergie élastique d'impact ainsi que la puissance élastique d'impact en fonction de la variation de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille,  $d=30$  ; 40 et 50 mm. Nous remarquons, que les courbes des figures varient proportionnellement avec la vitesse de rotation, elles peuvent atteindre des valeurs maximales en augmentant le diamètre de la bille.

Pratiquement, cette énergie élastique représente l'énergie cinétique de choc de la bille, ou encore l'énergie d'impact avec la paroi de la jarre lors du broyage par mécanosynthèse, ce qui va entraîner une déformation de la bille et une usure à observer au niveau de la surface de la bille en fonction de la durée de broyage, sans omettre un résultat

de l'élévation de la température à l'intérieur de la jarre. Quant à, la puissance élastique d'impact qui signifie la quantité d'énergie élastique entraînant la déformation la bille pour un temps de lancement et de sa chute libre à l'intérieur de la jarre. La déformation de la bille varie selon la nature du matériau pour le broyage par la technique de mécanosynthèse.

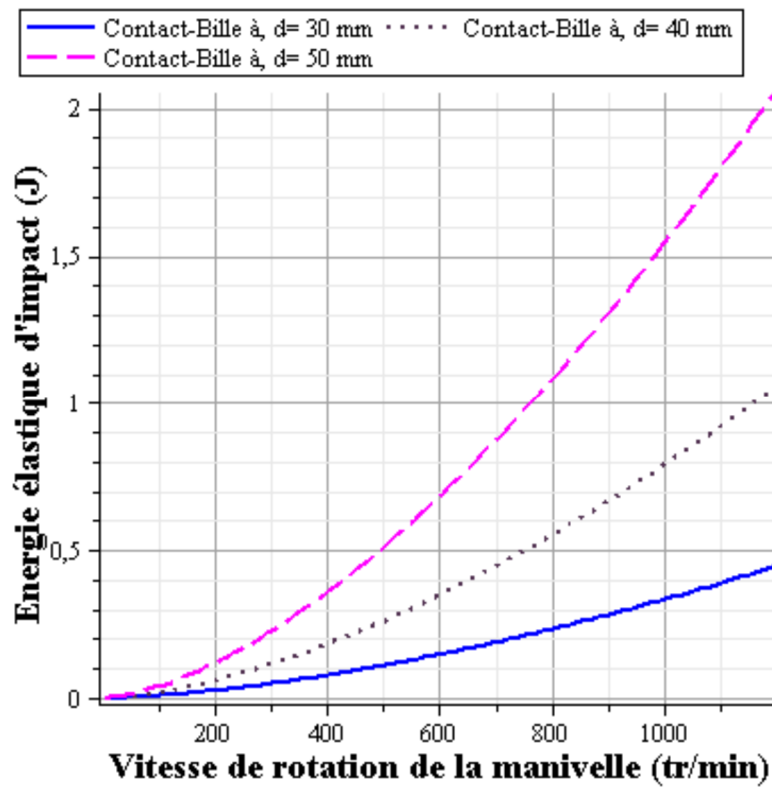


Figure IV.9: Energie élastique d'impact de la bille en fonction de la vitesse de rotation de la manivelle pour des diamètres de la bille, d=30 ; 40 et 50 mm.

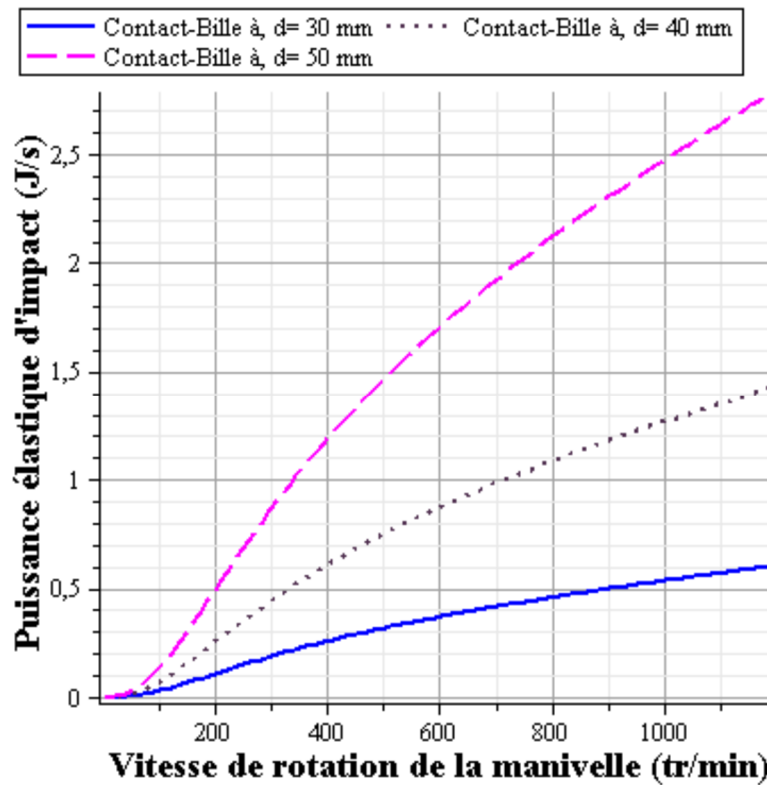


Figure IV.10: Puissance élastique d'impact de la bille en fonction de la vitesse de

#### IV.8 Dimensionnement du broyeur mécanique

Après avoir étudié les forces et les pressions qui se créent lors du broyage mécanique où, nous avons travaillé avec une seule bille en mouvement de choc à l'intérieur de la jarre de notre broyeur mécanique qui fonctionne par système bielle manivelle, nous avons ensuite fait varier la vitesse angulaire de la manivelle jusqu'à 1200 tr/min, en utilisant les mêmes dimensions géométriques données ci-dessus, c'est-à-dire : la longueur de la bielle,  $l_b=77$  mm; le rayon de la manivelle,  $r_m=27$  mm et le diamètre de la bille,  $d_b= 30 ; 40$  et 50 mm.

Ces paramètres géométriques ont été modifiées en affectant différentes valeurs, et pour une seule vitesse de rotation de l'arbre du moteur électrique entrainant la manivelle à,  $\omega=900$  tr/min, en vue d'obtenir, à l'aide d'un programme informatique en Fortran, plusieurs résultats de types dimensionnels et énergétiques qui sont illustrés dans le tableau 4.1.



En plus, d'autres formules mathématiques ont été utilisées pour compléter les dimensions du broyeur mécanique, sont définies par:

$$l_c = h_j + S + C_1 \quad (4.1)$$

$$\phi_j = \phi_b + 1 \quad (4.2)$$

$$\phi_c = \phi_j + 19 \quad (4.3)$$

Avec :

- $l_c$  : La longueur du cylindre;
- $h_j$  : La hauteur de la jarre;
- $\phi_j$  : Le diamètre de la jarre;
- $\phi_c$  : Le diamètre du cylindre;
- $\phi_b$  : Le diamètre de la bille;
- $S$  : La course du piston.

Et :

$C_1$  : Une constante supposée égale à, 50 mm



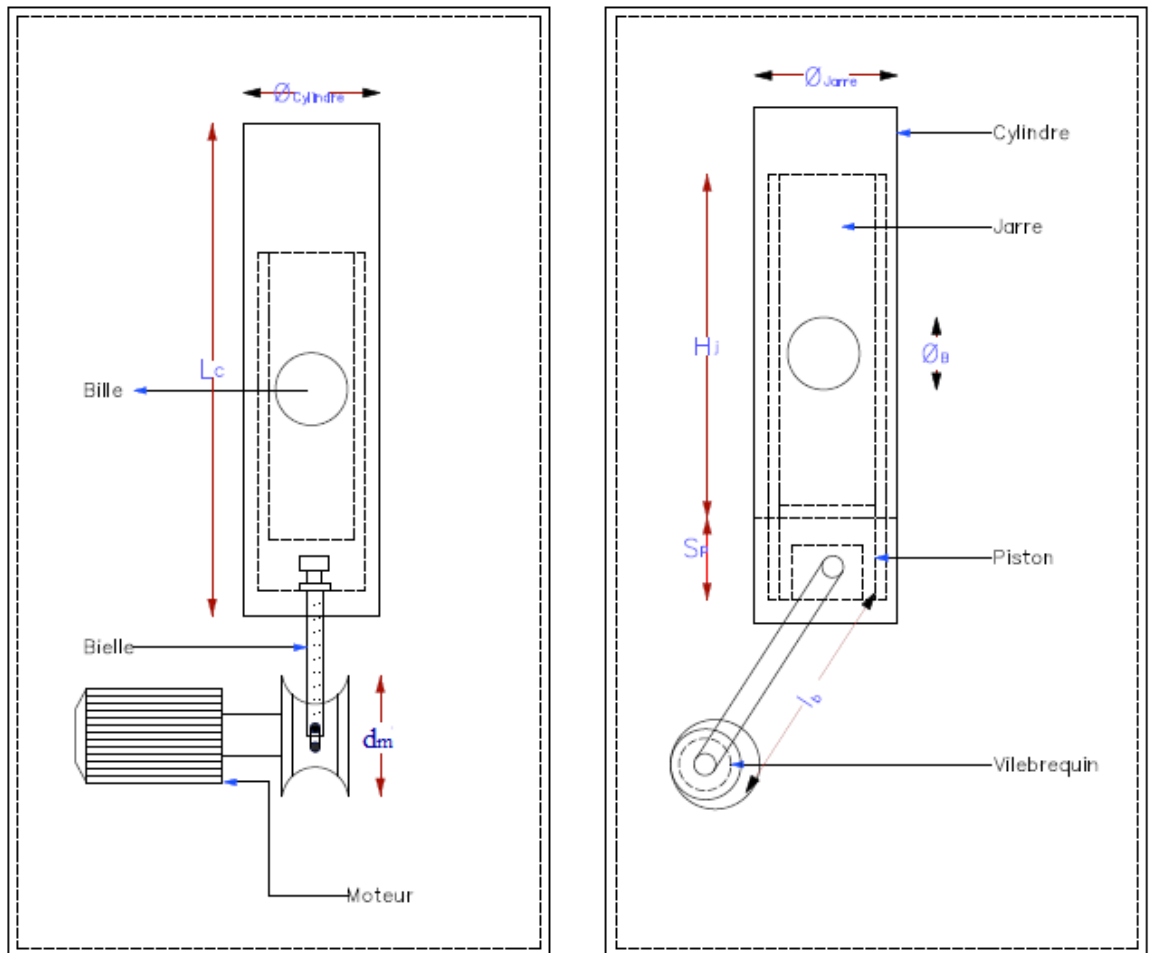


Figure :VI.11 Schéma d'un broyeur mécanique de système bielle-manivelle.

## **CONCLUSION GENERALE**

Ce travail a été consacré à l'étude d'un broyeur mécanique de système bielle-manivelle fonctionnant avec une seule grande bille conçu, à l'élaboration des nanomatériaux par la technique de mécanosynthèse en tenant compte de plusieurs paramètres de broyage dans le but de déterminer les forces énergétiques et élastiques qui se créent lors du choc de la bille avec la paroi interne de la jarre, et qui ont toutefois un effet majeur sur l'aspect thermique de cette technique.

En effet, cette étude consiste à faire varier quelques paramètres qui influent sur les forces énergétiques et élastiques tels que la longueur de la bielle, le rayon de la manivelle, le diamètre de la bille et la vitesse de rotation de la manivelle.

En plus, ce travail nous a permis de faire une étude de dimensionnement du broyeur mécanique, où nous avons fait varier plusieurs paramètres géométriques afin d'obtenir des résultats sous forme d'un tableau pour le choix de différentes de broyage afin d'obtenir des résultats dans un tableau pour le choix de différentes variantes du broyeur.

Ce type de broyeur présente plusieurs avantages par rapport à d'autres broyeurs mécaniques utilisés en mécanosynthèse car, il fonctionne d'une seule bille ce qui empêche la contamination, la consommation d'énergie est faible pour l'alimentation du broyeur, il donne un broyage efficace et plus intense, et le cout de fabrication est dix fois moins chère que le broyeur planétaire PM 400.

Tableau 4.1: Valeurs dimensionnelles du broyeur mécanique de système bielle-manivelle.

Type du moteur électrique	$\Omega$ (tr/min)	$r_m$ (mm)	$l_b$ (mm)	$h_j$ (m)	$v_b$ (m/s)	$\phi_b$ (mm)	$l_c$ (mm)	$\phi_j$ (mm)	$\phi_c$ (mm)	$S_p$ (mm)	$E_c$ (J)	$f_c$ (Hz)	$E_i$ (J/choc)		
Voir annexe pour le choix du moteur électrique	900	27	70	0.4466	-2.7305	30	593.657	31	50	97	0.4216	1.7467	0.7364		
				0.4466	-2.7305	40	593.657	41	60	97	0.9994	1.7467	1.7457		
				0.4466	-2.7305	50	593.657	51	70	97	1.9519	1.7467	3.4096		
			77	0.4447	-2.6984	30	598.763	31	50	104	0.4117	1.7650	0.7268		
				0.4447	-2.6984	40	598.763	41	60	104	0.9760	1.7650	1.7227		
				0.4447	-2.6984	50	598.763	51	70	104	1.9063	1.7650	3.3648		
			85	0.4452	-2.6710	30	607.205	31	50	112	0.4034	1.7808	0.7184		
				0.4452	-2.6710	40	607.205	41	60	112	0.9563	1.7808	1.7030		
				0.4452	-2.6710	50	607.205	51	70	112	1.8678	1.7808	3.3261		
			900	32	70	0.6278	-3.3256	30	779.83	31	50	102	0.6254	1.4479	0.9055
						0.6278	-3.3256	40	779.83	41	60	102	1.4825	1.4479	2.1455
						0.6278	-3.3256	50	779.83	51	70	102	2.8955	1.4479	4.1224
	77	0.6168			-3.2716	30	775.89	31	50	109	0.6052	1.4698	0.8896		
		0.6168			-3.2716	40	775.89	41	60	109	1.4347	1.4698	2.1088		
		0.6168			-3.2716	50	775.89	51	70	109	2.8022	1.4698	4.1128		
	85	0.6098			-3.2258	30	776.82	31	50	117	0.5884	1.4888	0.8760		
		0.6098			-3.2258	40	776.82	41	60	117	1.3948	1.4888	2.0766		
		0.6098			-3.2258	50	776.82	51	70	117	2.7242	1.4888	4.0560		



# Annexe

## CARACTERISTIQUES ET NUMERO DE REFERENCE 6 POLES 1000 TR/MIN [29 ]

Puissance normale		Désignation de carcasse	Classe de couple	Caractéristique de couple suivant N° de fig	N° d'identification 890-100	Poids net Env kg	Moment d'inertie J Kg m <sup>2</sup>	Vitesse nominale Tr min	Rendement %	Facteur de puissances Cosφ	Courant nominal sous 380v A	Couple nominal Nm	Rapport du couple Initial de démarrage sur le couple nominal	Rapport du courant Initial de démarrage sur le courant nominal	Rapport du couple de décrochage sur le couple nominal
Kw	Ch														
0.25	1/3	71	16	6	890-100-0736-121	6	0.0006	830	65	0.80	0.82	20	2.0	2.3	2.3
0.37	½	80	16	6	0806-021	7.5	0.0015	900	66	0.74	1.15	3.9	2.2	3.6	
	¾							905	70	0.73	1.63	5.8	2.3	3.8	
0.55							0.0018								
0.75	1	90S	16	6	0906-021	12.2	0.0028	900	71	0.75	2.15	8.0	1.8	3.6	1.9
1.1	1.5	90L	16		0966-041	15.7	0.0038	900	74	0.75	3.0	12	2.0	3.8	2.2
1.5	2	100L	16	6	1066-041	22	0.0063	925	76	0.76	4.0	15	2.0	4.5	2.1
2.2	3	112M	16	6	1136-041	35	0.011	945	78	0.74	5.8	22	2.0	5.1	2.4
3	4	132S	16	6	1306-041	49	0.020	955	80	0.75	7.6	30	2.0	5.5	2.4
	5.5	132M	16	6	1336-041	56	0.028	960	83	0.76	9.5	40	2.4	6.2	2.8
	7.5	132M	16	6	1356-041	62	0.035	960	83	0.73	13.8	55	3	6.2	3.2
5.5															
7.5	10	160M	16	6	1636-041	91	0.055	965	84	0.75	18.1	74	2.6	6.4	3.0
11	15	160L	16		1666-041	119	0.080	965	88	0.78	24.3	108	2.7	7.2	3.0
15	20	180L	16	4	1866-041	180	0.17	970	68.5	0.82	31.5	147	2.6	5.7	2.2
18.5	25	200L	16	4	2060-041	180	0.30	975	90	0.83	37.5	180	2.7	5.7	2.3
22	30	200L	16	4	2076-041	225	0.30	975	90	0.83	44.5	216	2.6	5.7	2.2
30	40	225M	16	4	2236-041	315	0.53	980	91.5	0.84	59	294	2.6	5.7	2.2
37	50	250M	16	4	2536-041	435	0.8	980	91.5	0.85	72	363	2.6	5.7	2.2
45	60	280S	16	4	2806-041	530	1.4	980	92.5	0.85	87	441	2.3	6.0	2.4
55	75	280M	16		2836-041	600	1.6	980	93	0.85	106	539			
75	100	315S	16	4	3106-041	820	3.0	985	93.5	0.85	144	725	2.3	6.0	2.3
90	125	315M	16		3136-041	920	3.5	985	94	0.85	172	872	2.3	6.0	2.3
110	150	315M	13	10	3146-041	1160	4.3	990	94.5	0.85	210	1080	1.9	6.2	2.3
160	220	355/1	13	10	3546-141	1400	7.8	985	94	0.87	295	1570	2.4	6.5	2.4
200	270	355/2	13		3566-141	1620	9.5	985	94.5	0.87	370	1960			
250	340	400/1	13	10	4046-141	2010	16	990	94.5	0.87	460	2450	2.4	7.0	2.4
315	430	400/2	13		4066-141	2360	20	990	95	0.87	580	3090			

Forme de construction B3=0

B5=1