

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE de L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET de la RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA
Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Aéronautique

Thèse DE MASTER

En aéronautique

Spécialité : structure avion

**Modélisation d'un broyeur aux poudres
nanocristallines**

Par :

BENDIF Akram
YEHYAOUI Hassiba

Promoteur: S.BEURGEUL
Co promoteur: D.ZIDANE

Blida, octobre 2012

Remerciements

Tout d'abord je remercie Dieu Clément et Miséricordieux de m' avoir donné la force et la volonté d'achever ce travail.

Mes remerciements les plus vifs s'adressent à Mr Bergheul qui m'a proposé le sujet de ma thèse et qui a bien voulu être mon promoteur ainsi que Mr Zidane qui m'a honorés en acceptant d'être mon Co-promoteur.

J'adresse, également mes sincères remerciements à ma famille ainsi que tous ceux qui ont contribué à notre formation de près ou de loin. Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner mon travail.

Une pensée va à Mr monsieur Tahi Ali « dieu paix à son âme ».

Enfin, je présente mes remerciements les plus distingués et mes salutations les plus chaleureuses à l'ensemble des enseignants du DAB

(Département d'aéronautique de Blida.)

Cette liste de remerciements n'est pas exhaustive, que tous ceux avec lesquels j'ai interagi lors de ce travail, sans toutefois les citer ci-dessus, sachent que leur contribution à la réalisation de ce mémoire a été grandement appréciée.

Akram

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A mon frère et ma sœur pour leurs soutiens permanant.

*A toutes ma famille Bendif spécialement mes très chère grand-mères
« que dieu la garde ».*

A tous mes camarades étudiants, à mes fidèles amis ainsi qu'à tous ceux que j'ai connus.

:
يستند الميكانيكي لتحسين هذه العملية. العملية
تأثير الميكانيكي فعالية عملية
بين الميكانيكي
والبودرة العديد غير مرضية حيث
تقنيات وهناك رئيسية
يمكن
توفير
تلويث
جديد
فعالية هذا
نتائجه
البرمجيات،
يحرك طريق آلية

كلمات المفاتيح:

Résumé :

Le broyage mécanique est référé à l'impact mécanique créé par les collisions entre les billes et la poudre.

Beaucoup de techniques de broyage ont été jusqu'ici développées pour améliorer le processus. Cependant, l'efficacité du processus du broyage mécanique reste insatisfaisante en termes de bilan énergétique, comme y'a d'autres problèmes majeurs qui inhérents au processus comme la contamination des poudres par les billes, et la température qui pourrait influencer les propriétés des matières broyées.

Dans le but d'économiser l'énergie, diminuer la température ainsi qu'éviter la contamination de la poudre lors de broyage, on a proposé un nouveau type de broyeur a une seule bille agitée par un mécanisme bielle-manivelle.

Pour s'assurer de l'efficacité de cette nouveauté on a comparé ses résultats avec ceux déjà existants. En utilisant le logiciel Fortran et Matlab.

Mots clés : paramètres de broyage, mécanosynthèse, Broyeur bielle manivelle, température de contact.

Abstract :

The mechanical grinding is referred to (based on) the mechanical impact created by collisions between the balls and the powder.

Many milling techniques have so far been developed to improve the process. However, the effectiveness of mechanical grinding process remains unsatisfactory in terms of energy balance, as there are other major problems inherent in the process as the powder contamination by the balls, and the temperature could influence the properties of materials crushed.

In order to save energy, reduce the temperature and avoiding contamination of the powder during milling, proposed a new type of mill has only one ball, stirred by a crank mechanism.

To ensure the effectiveness of this innovation, we compared its results with existing ones. By using the software, FORTRAN and MATLAB.

Keywords : grinding parameters, mechanical alloying, rod mill, crank contact temperature, impact energy

Listes des acronymes et abréviations

R_D :	l'origine O et le centre C de la jarre.
R_V :	le rayon de la jarre.
Ω :	la vitesse de rotation de la jarre.
$(F_v \text{ et } F_d)$:	la force centrifuge, en provenance de la rotation de la jarre et le disque.
F_C :	la force centrifuge agissant sur la bille.
ϕ :	L'angle entre la vitesse de décollage (v) au point $P_2 (x_2, y_2)$ et la direction radiale de la jarre.
β :	l'angle entre le rayon ($C_2 P_2$) et la ligne horizontale.
α :	l'angle entre la vitesse v et la ligne horizontale.
E_t :	L'énergie d'impact de la bille cinétique de broyage.
V_r :	La vitesse relative de la bille de broyage dans la jarre.
V_{pi} :	Le vecteur vitesse de la jarre en position $P_2 (x_2, y_2)$.
$V_{decolage}$:	Le vecteur vitesse de la bille de broyage en position $P_2 (x_2, y_2)$.
P_t :	La puissance d'impact de la bille de broyage.
F_n :	La force d'impact normale.
ω_r :	La vitesse angulaire de rotation.
V_t :	La vitesse de la bille de fraisage.
\dots_s :	Densité volumique de la bille, Kg/m^3 .
C_{ps} :	Chaleur spécifique de la bille, J/Kg .
E :	Module d'Young, N/m^2 .
R_b :	Rayon de la bille, m.
Γ_s :	La diffusivité thermique de la bille en m^2/s .
K_s :	La conductivité thermique de la bille en $\text{J}/\text{s.m. } ^\circ\text{K}$.
T_0 :	La température ambiante en $^\circ\text{K}$.
u :	Représente la fraction de la chaleur produite dans la poudre.
m :	La masse de la bille, Kg.
V_r :	La vitesse relative de la bille au moment de l'impact, m/s .
T_0 :	épaisseur poudre compacte.
D :	Diamètre de la poudre compacte, m.
U_p :	L'énergie d'impact modifié.

Table des matières

Listes des acronymes et abréviations

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Les nanomatériaux	
1.1 Introduction	3
1.2 Quesque la nanotechnologie ?	4
1.3 Définition et classification des nanomatériaux	5
1.3.1 Définition.....	5
1. 3.2. Classification	6
A -Matériaux de Dimension (0)	6
B -Matériaux de Dimension (1)	7
C -Matériaux de Dimension (2)	8
D -Matériaux de Dimension (3).....	8
1.4 Les procédés de fabrication des nanomatériaux	9
1.4.1 -Elaboration par voie physique	10
1.4.2 -Elaboration par voie chimique	10
A. Les réactions en phase vapeur	10
B. Les réactions en milieu liquide	11
1.4.3 -Elaboration par méthode mécanique « Mécanosynthèse »	12
1.5 -L'application des nanomatériaux dans le domaine aéronautique	13
1.5.1- Applications des nanomatériaux dans l'aéronautique	14
a. Structure de l'aéronef	15
B. Revêtements et les peintures	16
C. Les nanomatériaux et les moteurs d'aéronefs	16
D. Equipement intérieur et de l'ameublement	17
E. Autres applications aérospatiales des nanomatériaux	18

Chapitre 2 : Mécanosynthèse

2.1. Introduction	19
2.2. Définition	19
2.3 Types de broyeurs	20
2.3.1- Broyeur attriteur	21
2.3.2- Broyeur vibratoire	21
2.3.3- Broyeur planétaire	22
2. 4- Etude sur un broyeur planétaire	23
2.4.1 Introduction	24
2.4.2 Le principe de fonctionnement dans le broyeur planétaire	24
2.4.3 Modèle cinétique pour la trajectoire d'une bille de broyage unique dans un broyeur planétaire à billes	25
2.4.4 Un modèle pour le transfert d'énergie locale au cours du processus broyage à boulets	29
2.4.5 Applications des modèles de trajectoire et de l'énergie	31
A. Simulation de l'effet de la vitesse de rotation du disque sur des paramètres cinétiques	31
B. Simulation de l'influence du rapport ω / Ω sur les paramètres cinétiques	33
2.5 Conclusions	36

Chapitre 3 : Etude cinématique du broyeur système bielle manivelle

3.1 Introduction	37
3.2 Conception et principe de fonctionnement du broyeur	38
3. 3. Considérations préliminaires	38
3.4 Usure et choix de la bille	41
3.5 SYSTÈME BIELLE-MANIVELLE	41
3.5.1 Etude analytique du mouvement	43
3.5.2 La fréquence de la jarre	48

3.6 Étude des conditions de décollage de la bille	48
3.7 Calcul des énergies	51
3.7.1 Calcul de l'énergie cinétique d'impact	51
3.6.2 Calcul de l'Énergie de choc modifiée	52
3.8 Simulation du déplacement de la bille	52
3.9 Conclusion	56

Chapitre 4 : Etude thermique

4.1 Introduction	57
4.2 Mode de Propagation de chaleur	57
4.2.1 Conduction	57
4.2.2 Convection	57
A. Définition	57
B. Classification	58
4.2.3 Rayonnement	59
4.3 Aspect thermique du processus de mécanosynthèse	59
4.4 Modélisation thermique en mécanosynthèse	61
4.4.1 Première approche (cas semi-infini)	61
4.4.2 Deuxième approche (cas plaque plane)	62
4.4.3 Troisième approche (cas source plane instantanée)	64
4.5 L'organigramme de notre étude	65
4.6 Étude de la variation de la température.....	67
4.6.1 Conditions de broyage	67
4.6.2 Influence de la vitesse de choc sur l'énergie d'impact	68
4.6.3 Influence de la vitesse de choc sur la température de contact Bille-Poudre	72
4.6.4 Influence de la vitesse angulaire du vilebrequin sur la température de contact	63
4.6.5 Influence l'énergie d'impact de la bille sur la température de contact bille poudre	75

4.6.6	Température de contact et énergie dissipée Bille poudre en variant les matériaux « poudres »	77
4.6.7	Température de contact Bille poudre en variant les paramètres géométriques du broyeur 78	
	A – Influence de la longueur de la bielle sur la vitesse de choc 79	
	A – Influence Du rayon du vilebrequin sur la vitesse de choc 80	
4.7	Conclusion	82
	Conclusion générale	83
	Annexe	
	Références bibliographique	

Liste des figures

Figure 1.1 : Exemples d'objets présents dans la nature dans une échelle de taille en nanomètres.....	4
Figure 1.2: Types de nanomatériaux répertoriés en fonction de la dimension des phases nanométriques	5
Figure 1.3: Classification des nanostructures selon leur dimensionnalité	6
Figure 1.4: représentation d'un model d'avion Airbus	13
Figure 1.5 : l'intérieure d'un avion « structure interne »	14
Figure 1.6: Revêtement nano structuré	15
Figure 1.7 : l'application des nanomatériaux dans les Moteurs d'aéronefs	16
Figure 1.8: l'utilisation de nanomatériaux dans l'intérieur d'avion	17
Figure 2.1: Distribution de la taille des particules provoquée par la tendance des petites particules à se souder et les grandes particules a se fracturer « conditions d'équilibre »	19
Figure 2. 2: Broyeur attriteur : a) principe de fonctionnement, b) model 1-S	20
Figure 2. 3: Broyeur vibratoire : a) principe de fonctionnement, b) modèle SPEX 8000	20
Figure 2. 4: Broyeur planétaire : a) principe de fonctionnement, b) modèle PM400	21
Figure 2.5: Schéma du principe de fonctionnement du broyeur planétaire	23
Figure 2.6: La trajectoire de mouvement d'une bille, montrant les positions successives de la bille sur la surface de la jarre aux points d'initiation ($t = 0$), le détachement ($t = t_1$), et la collision ($t = t_1 + t_2$)	24
Figure 2.7: Variations de (a) la puissance de collision P_t , (b) la fréquence de collision f , et (c) l'énergie cinétique totale E_t en fonction de la vitesse de rotation du disque planétaire Ω pour différents niveaux de jarre / disque de rapport de vitesses ω / Ω	31
Figure 2.8: Les relations entre la vitesse de collision v_r , la fréquence collision, la puissance collision P_t , et le rapport de vitesse jarre sur le disque ω / Ω à $\Omega = 800$ TPM	33
Figure 2.9: Les relations entre l'énergie cinétique totale P_t , la puissance effective P_e , et le rapport de vitesse jarre sur le disque ω / Ω à $\Omega = 800$ TPM	34
Figure 3.1: Schéma du broyeur à système BIELLE-MANIVELLE	35

Figure 3.2 Broyeur bielle-manivelle en 3D, faite avec le logiciel 3D max	37
Figure 3.3: Schéma du Modèle de conception du broyeur bielle-manivelle	38
Figure 3.4: principe de fonctionnement d'une Bielle manivelle	40
Figure 3.5: Modélisation cinématique du broyeur à mécanisme bielle-manivelle	41
Figure 3.6 : schéma de déplacement de la bille en fonction du temps	43
Figure 3.7 Variation de la vitesse de la jarre en fonction de theta	44
Figure 3.8 : Variation du déplacement en fonction du temps	46
Figure 3.9 déplacement jarre et bille en fonction du temps	48
Figure 3.10 Posistion ascendante et descendante de la bille en fonction du temps	50
Figure 3.11: Posistion de la bille et de la jarre en fonction du temps dans les deux cas de vitesse angulaire (a) $\omega= 857$ tr/mn et (b) $\omega=1000$ tr/mn	51
Figure 4.1 : Représentation schématique de la poudre compacte prise entre la bille et la paroi pendant la collision	56
Figure 4.2: Représentation schématique de la poudre compacte	57
Figure 4.3: Assimilation de la bille à un corps semi-infini	58
Figure 4.4 : Assimilation de la poudre compacte à une plaque Plane à une dimension	60
Figure 4.5: Assimilation du système à une source plane instantanée	61
Figure 4.6. La variation de la température pour l'aluminium et titane en fonction de la variation de la vitesse de choc	65
Figure 4.7 : La variation de température pour l'aluminium et Titane en fonction de la variation de la vitesse angulaire	66
Figure (4.8) : (A): énergie d'impact en fonction de la vitesse de choc; (B) : température de contact en fonction de l'énergie d'impact	68
Figure 4.9 La variation de la vitesse en fonction de la longueur de la bielle C	71
Figure 4.10. La variation de la vitesse en fonction du rayon du vilebrequin r	73
Figure 4.11 : variation de l'énergie cinétique en fonction de la vitesse de choc de la bille	75
Figure 4.12 : variation de l'énergie cinétique en fonction de la vitesse de choc de la bille	76
Figure .4.13 : variation de la température de contact en fonction de l'énergie d'impact de la bille	77

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Constantes géométriques pour les configurations de broyeur	29
Tableau 2.2 Les paramètres de fonctionnement de configuration et paramètres physiques interdépendant	30
Tableau 2.3 Les valeurs du paramètre de fonctionnement	33
Tableau 3.1: Les paramètres d'entrée de la simulation	41
Tableau 3.2 : Temps et position de la bille à l'instant de décollement ainsi que la hauteur max de la bille et le temps pour l'atteindre pour les vitesses angulaire : 857tr/min et 1000tr/min	48
Tableau 3.3: Condition à la phase de collision	52
Tableau 4.1 Propriétés thermo-physique des poudres et de la bille	64
Tableau 4.2: La variation de la température pour l'aluminium et le titane en fonction de la variation de la vitesse de choc	65
Tableau 4.3 : La variation de température pour l'aluminium et titane en fonction de la vitesse angulaire	66
Tableau 4.4 la variation de température et l'énergie pour chaque matériaux pour $\beta=0.03$	69
Tableau 4.5: Variation de la température et de l'énergie en fonction des variations des matériaux / bille acier $\beta=0.09$	70
Tableau 4.6 : Variation de la température en fonction de la variation des vitesses / bille acier aluminium, titane	71
Tableau 4.7 variations des températures et l'énergie en fonction de variation de rayon	72

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.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre traite des généralités, il est constitué de quelques rappels importants sur les nanostructures et présente les différents procédés de fabrication des nanomatériaux, On présente aussi plusieurs domaines d'applications des nanomatériaux, en se basant sur l'industrie aéronautique.

Le chapitre deux quant à lui, traite la mécanosynthèse d'une part et l'étude d'un broyeur planétaire d'une autre part. Une grande place est donnée dans ce chapitre à la méthode de simulation du broyeur planétaire.

Au chapitre trois nous présentons le nouveau type de broyeur et son principe de fonctionnement et on démontre les équations implémentée pour nos calculs, dont l'élément essentiel est l'étude cinématique et énergétique, afin de justifié le choix de ce broyeur.

Dans le chapitre quatre, nous présentons et analysons les résultats obtenu de l'étude thermique du broyeur proposé, ainsi qu'une comparaison des paramètres énergétique et thermique avec le broyeur planétaire Pm 400.

Une partie conclusion, ou on donnera nos impression sur ce nouveau système de broyage.

1.1 Introduction :

La nanotechnologie est un jeu de construction à l'échelle atomique. Ce domaine de recherche commence à peine à être exploré, mais il pourrait bien s'imposer comme le développement technologique le plus important du 21^e siècle : avec elle, on quitte le monde mécanique de Newton et on rentre dans le monde quantique d'Einstein.

Le terme «nanotechnologie» regroupe un ensemble de théories et de techniques révolutionnaires qui visent à manipuler, étudier ou à fabriquer des objets de taille comparable à celle des atomes et des molécules, c'est-à-dire de l'ordre du millionième de millimètre ou autrement nanomètre (10^{-9}).

La conquête de l'infiniment petit par les informaticiens a profité aux nano technologues: les chercheurs peuvent maintenant concevoir des micromoteurs, des micros capteurs, des micros pompes, etc. L'essor des nanotechnologies, apparemment inéluctable dans le processus d'évolution, devait nous apporter énormément dans des domaines très vastes, il est également fort probable que ces technologies deviennent destructrices si nous ne les maîtrisons pas entièrement. Ainsi les lois physiques paraissant insurmontables aujourd'hui, pourraient être dépassées. Les produits créés pourraient être moins coûteux, plus solides, plus efficaces grâce à la manipulation moléculaire. En ce qui concerne le revers de la médaille, en effet de telles technologies capables de se reproduire ou du moins de se répliquer par elles-mêmes pourraient être tout simplement cataclysmique puisque, par exemple, des bactéries créées dans un quelconque intérêt commun pourraient se répliquer à l'infini et causer des ravages sur la flore mais aussi sur la faune et même sur l'humanité pour le cas le plus pessimiste.

En plus de cela les nanotechnologies représentent de nos jours, à cause des diverses applications que l'on en fait, un risque pour les individus sur le plan éthique. Aussi, les questions autour de ce phénomène sont nombreuses : Comment observer, manipuler et construire des nano-objets ? En quoi les nanotechnologies amélioreront notre quotidien?

Autant de questions qui trouveront des réponses à travers ce chapitre initiatique au monde de l'infiniment petit.

1.2 Quesque la 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 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 [26].

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 [26].

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.

1.3 Définition et classification des nanomatériaux :

1.3.1 Définition

Les nanomatériaux peuvent être définis de la façon suivante :

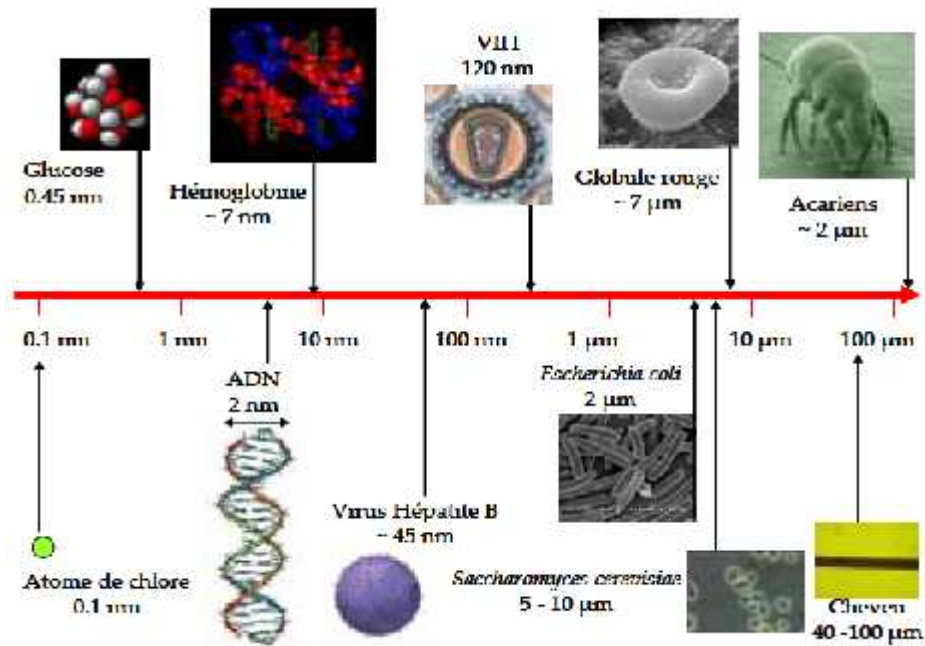


Figure 1.1: Exemples d'objets présents dans la nature dans une échelle de taille en nanomètres

Un nanomatériau est un matériau pour lequel au moins l'une des phases qui le compose a des dimensions inférieures à 100 nanomètres [46].

Un nanomètre (nm) est la milliardième partie d'un mètre. Il existe des nanomatériaux élaborés ou fabriqués par l'homme et d'autres existants dans la nature. La figure 1.1 montre divers objets présents dans la nature, placés par rapport à une échelle nanométrique. Cette échelle va depuis le dixième du nanomètre, typique des atomes de taille moyenne comme le chlore ou des petites molécules comme l'eau, jusqu'aux centaines de micromètres ($1 \mu\text{m} = 10^3 \text{ nm}$), caractéristiques des petits insectes comme les acariens. Plusieurs molécules sont positionnées sur cette échelle : l'ADN (2 nm de diamètre). Au-dessus de cette gamme de taille, nous pouvons trouver les virus, tels que les virus de l'hépatite B (VHB), représentés sur la figure (1.1). Au delà, dans le domaine des micromètres, on retrouve des bactéries, comme Escherichia coli [48].

1.3.2 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 [46].

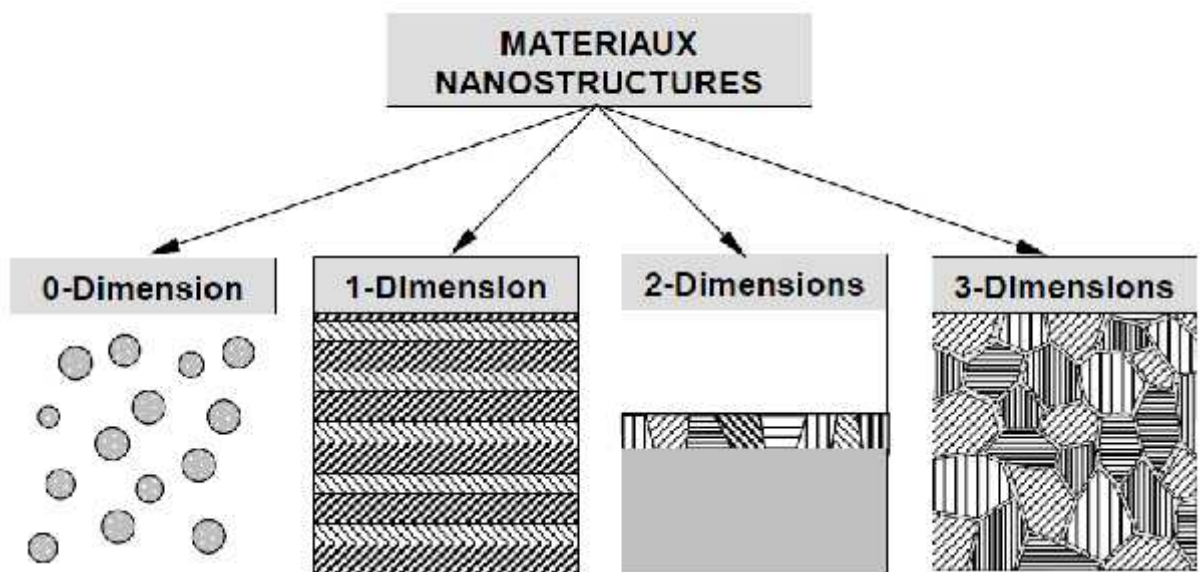


Figure 1.2 : Classification des nanostructures selon leur dimensionnalité

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 [47].

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 carbones et a un diamètre d'environ un nanomètre. Ces nanostructures sont antioxydante, 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 nanomètres et leur longueur de 500 à 10.000 nanomètres [47].

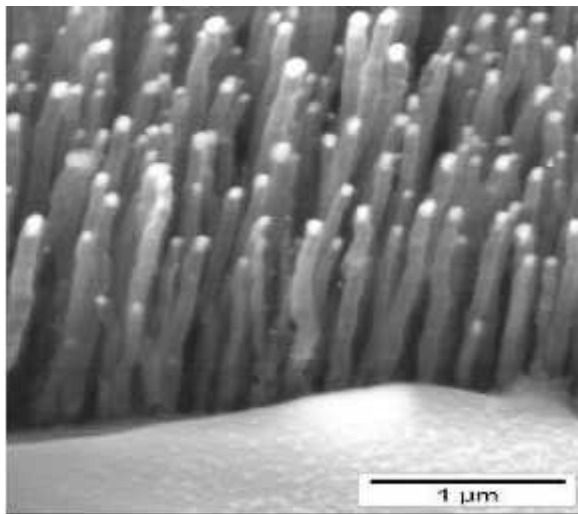


Figure 1.3 présentations microscopique des nano-fils

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 ») [48].

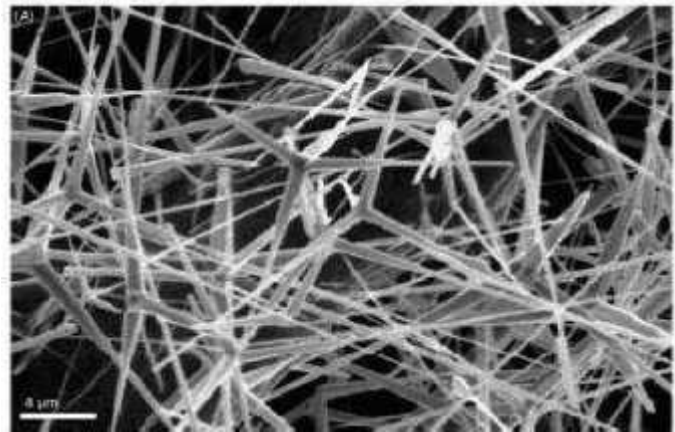


Figure 1.4 : nanotétrapodes vus au microscope numérique

Ces nanostructures possèdent des propriétés physiques optiques, de semi-conduction, piezoélectriques 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 [47], 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 [47].

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 [47].

1.4 Les procédés de fabrication des nanomatériaux

Les nombreuses techniques de création des nanostructures peuvent être classées selon deux voies [15]:

- La voie descendante (top-down) [16] : on part d'un matériau, on le « découpe » et on le « sculpte » pour réduire le plus possible les dimensions de l'objet ou du composant que l'on veut fabriquer. Cette technique permet notamment de fabriquer plusieurs milliers ou millions d'objets en parallèle. L'effort de miniaturisation a d'abord conduit à des composants de dimensions micrométriques pour descendre maintenant en dessous des 100 nanomètres. Il s'agit de la voie suivie par l'électronique depuis 30 ans. Toujours activement exploitée, elle se heurte de plus en plus à des limites techniques en descendant vers l'échelle nanométrique.

- La voie ascendante (bottom-up) [15] : on assemble la matière, atome par atome, pour construire des molécules que l'on intègre ensuite dans des objets ou des systèmes plus grands, afin d'obtenir les propriétés ou les fonctions désirées.

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

- ❖ Élaboration par voie physique;
- ❖ Élaboration par voie chimique;
- ❖ Élaboration 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:

1.4.1 -Élaboration par voie physique :

Le principe de la fabrication de nano poudre, par voie physique, consiste la plupart du temps à "geler" la croissance des grains de matière. Ainsi, l'élaboration des nano

particules se réalise souvent à partir d'une phase vapeur. Cette vapeur est extraite d'un matériau en fusion puis refroidie par collisions avec un gaz neutre. La vapeur est ensuite recueillie le plus rapidement possible sur une paroi froide : on limite ainsi la croissance des grains solides ou l'agglomération de ces derniers [17].

Les techniques de PVD (Physical Vapor Deposition) permettent la réalisation de couches minces ou de poudres nanométriques sans fondre le matériau de départ. La pulvérisation cathodique (sputtering) nécessite la création d'une cible solide du composé à déposer. On soumet cette cible à un bombardement d'ions lourds et peu réactifs chimiquement (souvent des ions Argon). Ces ions, chargés positivement, extraits d'un plasma, sont accélérés. Ils viennent percuter la cible et transfèrent leur énergie mécanique aux atomes qui sont pulvérisés vers le substrat. La maîtrise des conditions de dépôts (pression, état de surface et température du substrat...) permet alors la croissance de couches minces continues ou de grains à la surface du substrat [18].

1.4.2 -Élaboration par voie chimique :

L'élaboration de nanopoudre par des procédés physiques nécessite le contrôle des étapes de germination et de croissance d'agrégats d'atomes par des paramètres physiques. Les procédés chimiques font de même mais cette fois, des réactifs permettant de contrôler la germination, la croissance, la composition et la forme des grains interviennent. Ces réactions chimiques peuvent s'effectuer en phases vapeur, liquide, ou solide [19].

A. Les réactions en Phase Vapeur

La méthode la plus répandue est le dépôt chimique en phase gazeuse (CVD, chemical Vapor Deposition) [27]. Les matériaux précurseurs sont introduits sous forme gazeuse dans un réacteur permettant à la fois la dissociation des espèces et leur réaction chimique. La dissociation des gaz introduits est obtenue soit par activation thermique (on chauffe le mélange à des températures importantes, 800 à 1500 °C), soit par l'obtention d'un plasma très réactif (ce plasma sera alors créé par des champs électriques et magnétiques appliqués au mélange gazeux). Les espèces ainsi créées pourront réagir

chimiquement entre elles et venir se déposer en fines couches et/ou en nano-grains sur le substrat.

Le contrôle précis des conditions expérimentales (pression, température, mélange chimique) permettra de maîtriser la nature chimique ou cristallographique des composés fabriqués. L'aspect morphologique sera lui aussi contrôlé (couches minces continues, agrégats plus ou moins denses, etc.). L'intérêt ? Cette nature chimique du substrat et la qualité cristalline de la surface jouent un rôle prépondérant dans les processus de croissance. A titre d'exemple, on citera la fabrication de carbone dans tous ses états cristallins par cette technique. Ainsi, le mélange de méthane (CH_4) et d'hydrogène (H_2) introduit dans un réacteur de CVD pourra produire suivant les conditions expérimentales des couches continues et épitaxiées de diamant, des couches peu adhérentes de graphite ou la croissance localisée de nanotubes de carbone. Cette technique de CVD est bien sûr très adaptée à la fabrication de couches minces continues utilisées en microélectronique (couches semi-conductrices de silicium ou isolantes d'oxyde de silicium). Si la faible quantité de réactifs, contenue dans les gaz, est un atout pour la formation de très petites particules en concentration suffisamment faible pour limiter l'effet d'agglomération, elle ne favorise pas la fabrication en grande quantité de poudres et donc une productivité importante [27].

B. Les réactions en phase liquide

La synthèse en milieu liquide s'effectue souvent à partir d'une solution aqueuse ou organique contenant les réactants. La précipitation des nanoparticules est ici obtenue par modification de l'équilibre physicochimique, par exemple par l'ajout d'un réactif adéquat. On distingue généralement la coprécipitation chimique - facile à mettre en œuvre et très utilisée pour la fabrication industrielle - et l'hydrolyse permettant la fabrication de poudres homogènes tant en taille qu'en géométrie. La synthèse par voie liquide est adaptée aux grands volumes et à une production de masse de nano poudres. Le procédé sol-gel est le plus prometteur [29]. Il s'agit de produire des matériaux vitreux, sans recourir à la fusion.

1.4.3 -Élaboration par voie mécanique :

La technique dite de mécanosynthèse, ou *Mechanical Alloying*, consiste à broyer des poudres micrométriques (1 à 30 micromètre) de plusieurs alliages. Ce co-broyage se réalise à sec ou en présence d'un agent de contrôle pour mélanger les poudres d'éléments purs ou pré - alliés dans un broyeur à haute énergie. Cette action mécanique sur la matière pourra avoir trois conséquences : d'abord, la réduction des tailles des grains de matière et leur homogénéisation à l'échelle nano, sans réaction chimique. Ainsi, le mélange initial composé de poudres base Al ou Ni (matrice du matériau) et des poudres d'oxydes et/ou de carbures, est sollicité mécaniquement et soumis à une succession de collage (soudage) décollage (décohésion) des particules. Cette succession purement mécanique a pour rôle d'homogénéiser physiquement les constituants initiaux et de stabiliser des propriétés mécaniques ou thermiques à l'alliage ainsi constitué. Autre conséquence : l'amorphisation des grains. Le travail mécanique peut induire une transition d'une phase cristalline en une nouvelle phase amorphe souvent très difficile à obtenir par d'autres méthodes. Enfin, l'activation de réactions chimiques peut également être induite par l'extrême division de la matière [30].

Une autre approche mécanique de la synthèse de nano-matériaux passe par l'application de fortes déformations à des matériaux ou à des assemblages de matériaux. Une succession cyclique de laminage appliquée à des feuilles millimétriques de fer et d'argent permet d'obtenir des "millefeuilles" à l'échelle nanométrique de ces composés possédant des propriétés magnétiques similaires à celles obtenues par dépôts successifs de ces éléments sur un substrat. De la même manière, une succession d'étirage de fils de cuivre et de niobium permet la réalisation de conducteurs nanométriques de niobium, insérés dans une matrice de cuivre.

La fabrication des nanomatériaux nécessite le contrôle des conditions de synthèse afin de limiter la croissance des matériaux. Ce contrôle passe souvent par une dilution importante des réactifs (voie gazeuse) ou des conditions rapides ou métastables de cristallisation (voie chimique). Ces conditions sont souvent peu compatibles avec une production de masse. La mécanosynthèse, malgré un rendement énergétique souvent

peu satisfaisant, peut toutefois prétendre à la fabrication d'une plus grande quantité de matériau [30].

1.5 -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 [31].

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



Figure 1.5 : représentation d'un model d'avion AirBus

1.5.1- 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 [32].

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 [32].

Les nanomatériaux peuvent être utilisés principalement dans quatre domaines de l'industrie de l'aviation [33] :

- A. Structure de l'aéronef ;
- B. Revêtements et les peintures;
- C. Moteurs et pièces de moteurs;
- D. Équipement intérieur et de l'ameublement.

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 [33], 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 [43].



Figure 1.6 : 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 [33].

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 [44] ;
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 [44].

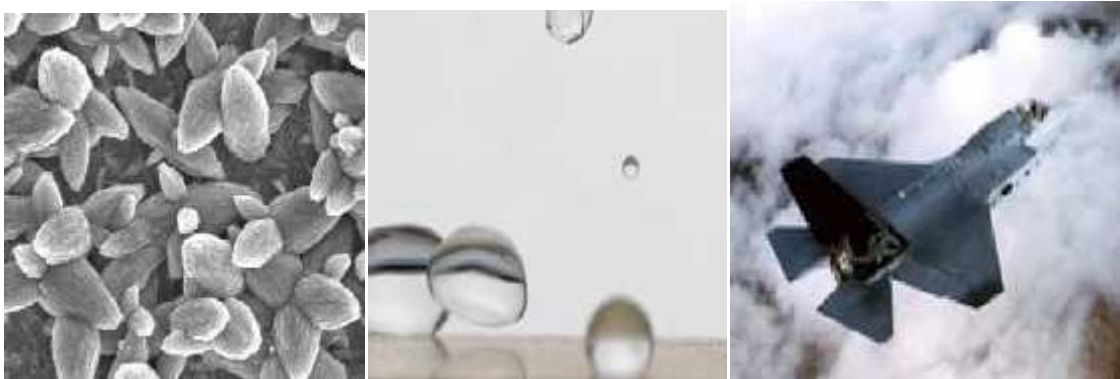


Figure 1.7 : Revêtement nano structuré

C. Les nanomatériaux dans les moteurs d'aéronefs

On cite quelques applications des nanomatériaux dans la motorisation [50]:

- 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 [34]:

- 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 [34].

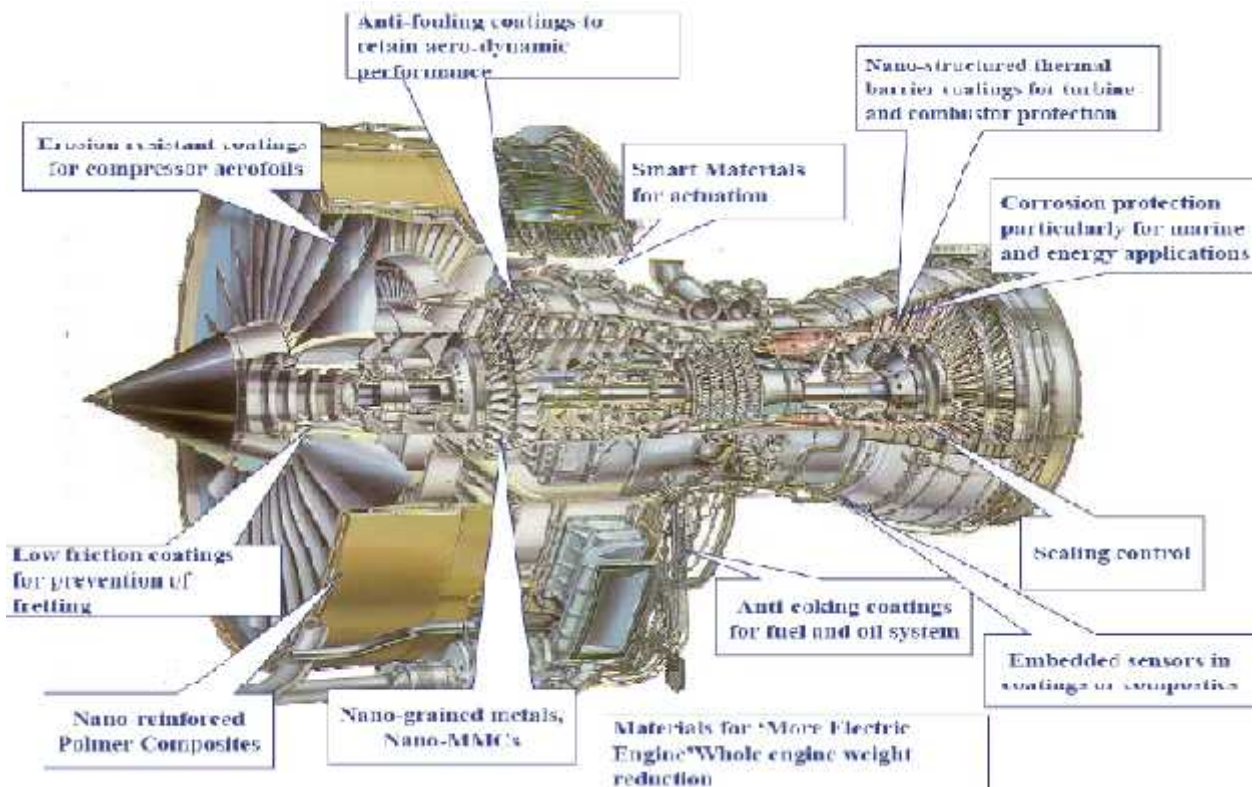


Figure 1.8 : l'application des nanomatériaux dans les Moteurs d'aéronefs

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 [51].

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 [34] ;
- 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 [34].



Figure 1.9 : l'utilisation de nanomatériaux dans l'intérieur d'avion

E. 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 [34].

2.1 Introduction :

La mécanosynthèse est un moyen d'obtenir des poudres avec des grains de taille nanométrique. Mais ce type de broyage à haute énergie ne sert pas seulement à l'affinement des microstructures, [27], il peut aussi induire des réactions chimiques entre poudres cobroyées ou entre poudres et atmosphère de broyage et diverses transformations structurales ou chimiques...

2.2 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 chimiques entre des poudres cobroyées ou entre poudre et atmosphère de broyage, il en résulte des transformations chimiques ou structurales [21]. Durant le broyage haute énergie, les particules de poudres sont présentes 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 à augmenter la taille moyenne des particules. Par contre, la rupture tend à diminuer leur taille moyenne (figure 2. 1). [27] Les petites particules résistent à la déformation sans être fracturées et tendent à être soudées sous forme d'agglomérat.

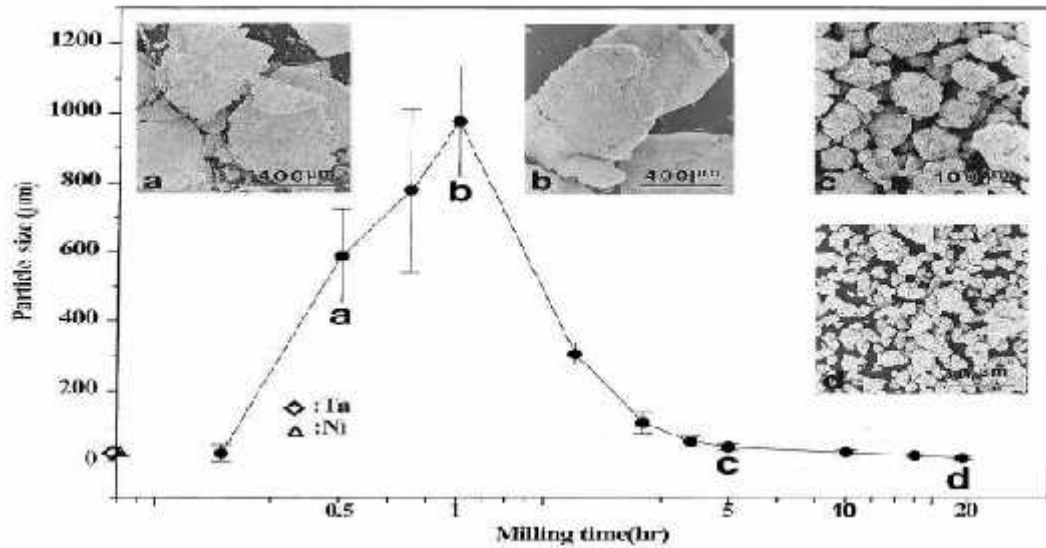


Figure 2.1. Distribution de la taille des particules provoquée par la tendance des petites particules à se souder et les grandes particules à se fracturer dans les conditions d'équilibre.

2.3- Types de broyeurs :

Différents équipements, peuvent être utilisés pour la production de poudres par mécanosynthèse. Les principaux broyeurs utilisés sont trois types : broyeur attriteur, broyeur vibratoire et broyeur planétaire.

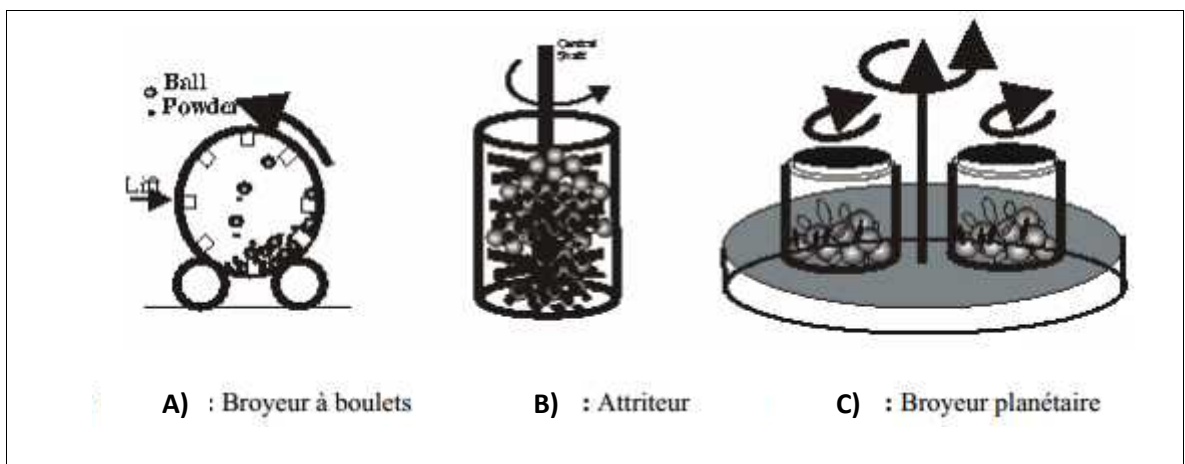
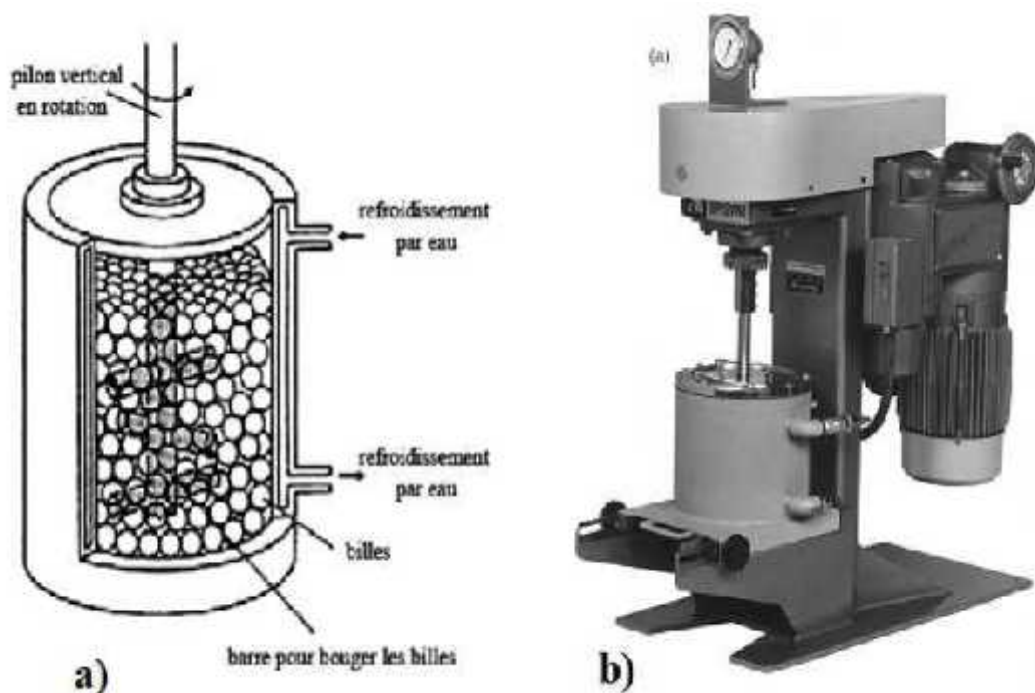


Figure 2.2. Schématisation des différents types de broyeur

2.3.1- Broyeur attriteur

Il est constitué d'un caisson vertical, d'un axe agitateur sur lequel sont fixés des barres perpendiculairement (figure 2. 2). Le broyage agit uniquement par frottements des billes sur la poudre [22]. 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 [23].



2.3.2- 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 2. 3). Le broyage se fait uniquement par chocs [22].

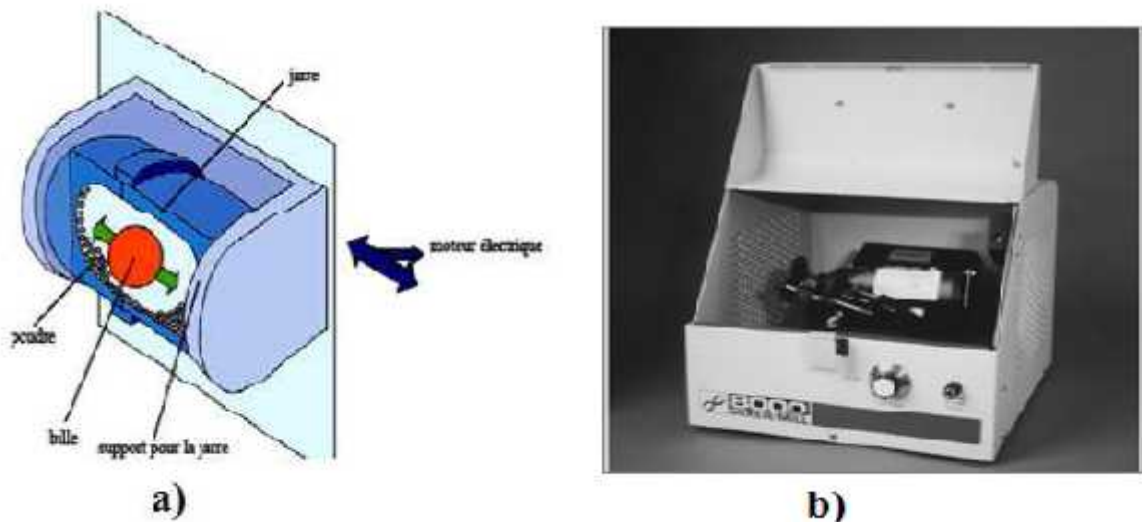


Figure 2. 4. Broyeur vibratoire : a) principe de fonctionnement, b) modèle SPEX 8000

2.3.3- 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 2. 4). 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 zircone [24]

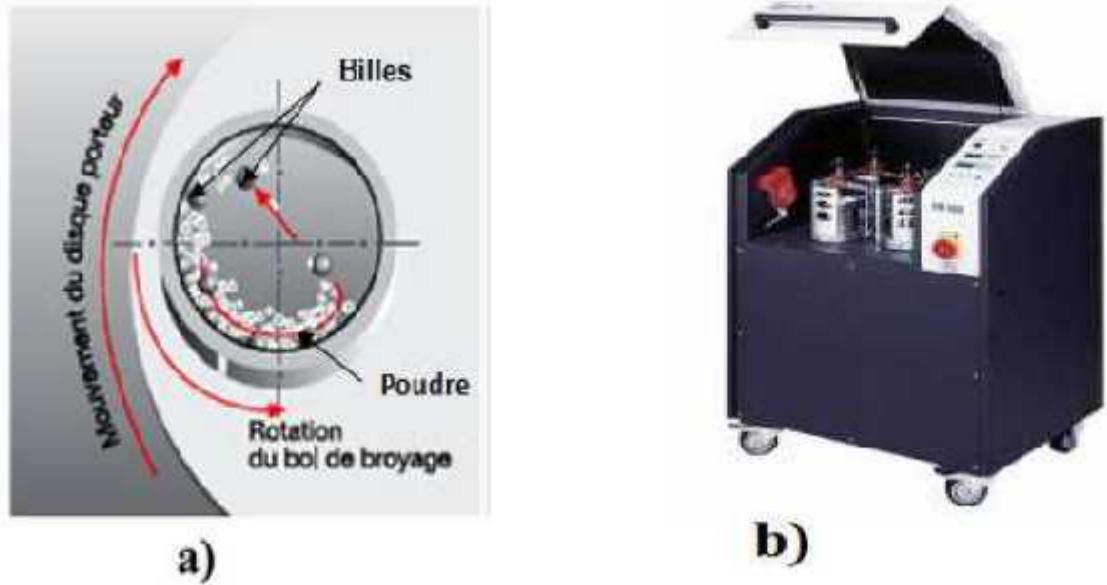


Figure 2. 5. Broyeur planétaire : a) principe de fonctionnement, b) modèle PM400.

2. 4- Étude d'un broyeur planétaire:

Un modèle cinétique est proposé pour simuler la trajectoire d'une bille de broyage unique dans un broyeur planétaire, et un modèle est également proposé pour simuler le transfert d'énergie locale au cours du processus de broyage bille selon aucune condition de glissement. Basée sur la cinématique du mouvement de la bille, la fréquence de collision et la puissance sont décrites, et les forces d'impact normal et la puissance effective sont dérivées à partir d'analyses de la géométrie de collision. La théorie de l'impact est appliquée à la formulation de ces modèles, après avoir établi des relations entre les paramètres géométriques, dynamiques, et thermo physiques.

La simulation est effectuée sur la base de deux modèles, et les effets de la vitesse de rotation du disque planétaire Ω et le rapport de vitesse jarre sur disque ω / Ω sont étudiée sur d'autres paramètres cinétiques. Par conséquent, la proportion optimale ω / Ω pour obtenir l'énergie d'impact élevée dans l'état de fonctionnement standard à $\Omega=800\text{tr/mn}$ est estimé, et est égal à 1,15.

2.4.1-Introduction :

Plusieurs études antérieures ont examiné le développement de modèles cinétiques liés à l'usinage mécanique. Beaucoup de tentatives ont été faites pour simuler la cinétique du processus de broyage en termes de vitesse de la bille, la fréquence de l'impact, et de l'énergie cinétique transférée à la poudre pendant le broyage [1-13].

Le rendement de conversion de la puissance totale générée par un impact, à la puissance transférée de la bille à la poudre lors de l'impact et la fréquence d'impact sont deux paramètres importants qui déterminent l'efficacité du procédé de broyage. [1]

La vitesse d'impact de la bille de broyage et la température de la jarre peuvent être expérimentalement contrôlées pendant le broyage, et les mécanismes de variation de l'énergie peuvent ainsi être étudiés.

Plusieurs modèles pour décrire la cinétique et la trajectoire de la bille de broyage ont été proposées par Burgio, [5] Magini, [6] Abdellaoui, [9] Dallimore [12], et Chattopadhyay [13] de sorte à calculer la vitesse de la bille de broyage et de son transfert d'énergie.

Zidane et al [14], ont établis une équation décrivant la température de contact au point d'impact en fonction d'autres paramètres.

2.4.2- Le principe de fonctionnement dans le broyeur planétaire

Soit quatre ou deux jarres réglées de façon symétrique sur un disque planétaire. Chaque jarre tourne autour de son centre C, ainsi que autour de l'origine situé au centre du disque planétaire dans le sens inverse (figure 2.5).

Chaque mouvement confère une énergie cinétique élevée à la bille. La force centrifuge induite par la rotation entraîne le déplacement de la bille le long de la paroi de la jarre, tandis que la friction, induite par les différences de vitesse entre la paroi de la jarre et la bille, agit sur les échantillons pour être broyer. Quand la vitesse augmente, la force de Coriolis (force de sollicitation de rotation) pousse la bille de broyage de quitter la paroi de la jarre. Par la suite, la bille commence à se déplacer à l'intérieur de la jarre,

frappant les échantillons de poudre contre la jarre en mouvement, et libère ainsi un impact massif momentané.

La combinaison de quantité de mouvement d'impact et de la force de frottement confère une haute capacité de broyage au broyeur planétaire.

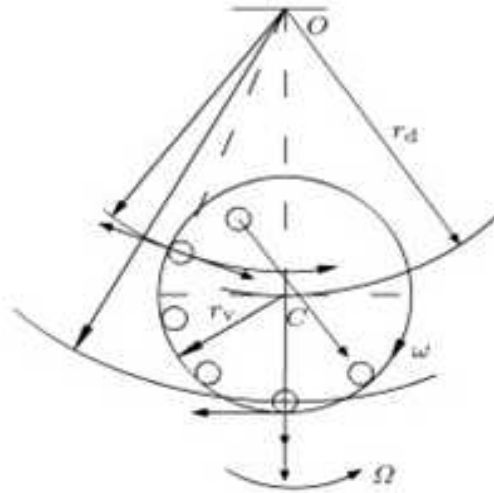


Figure 2.6 Schéma du principe de fonctionnement du broyeur planétaire.

2.4.3- modèle cinétique pour la trajectoire d'une bille de broyage unique dans un broyeur planétaire à billes

Comme le montre la Figure (2.6), un modèle cinétique est établi dans l'espace de référence cartésienne sur la base du modèle établi par Chattopadhyay [13].

L'analyse cinématique du mouvement des billes est présentée ici en termes d'un repère cartésien sphérique avec son origine (O) situé au centre du disque planétaire [13], la distance entre l'origine O et le centre C de la jarre est R_D , et R_V est le rayon de la jarre. La vitesse de rotation Ω du disque est dans le sens anti-horaire.

La vitesse de rotation de la jarre dans le sens horaire par rapport à la ligne OC est ω .

La direction est déterminée par la vitesse de rotation de la droite OC. Conformément au mouvement planétaire du broyeur.

$P_0(x_0, y_0)$ est un point sur la surface de la jarre allongé sur la droite OC, qui est considéré comme le point initial du mouvement bille.

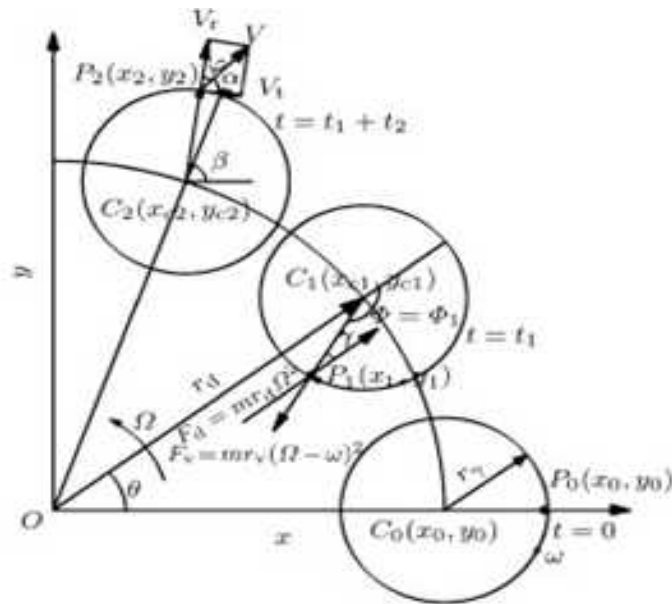


Figure 2.7. La trajectoire de mouvement d'une bille, montrant les positions successives de la bille sur la surface de la jarre aux points d'initiation ($t = 0$), le détachement ($t = t_1$), et la collision ($t = t_1 + t_2$).

La résolution de la force centrifuge, en provenance de la rotation de la jarre et du disque (F_v et F_d) le long de la direction ($P_1.O$), donne la force de réaction nette (F_c) agissant sur la bille (figure 2.6). Au niveau du point de détachement (soit, à l'instant $t = t_1$), la réaction résultante sur la bille est réduite à zéro (soit $F_c = 0$), et donc la bille part de la paroi de la jarre. Le mouvement de la bille continue pour un t_2 sans accélération jusqu'à ce qu'il entre en collision avec la surface jarre (figure 2.6), entrant ainsi dans le prochain cycle de son mouvement.

Pour simplifier l'analyse, les hypothèses suivantes pour le système cinétique sont proposées:

- (1) Le système de mouvement dans la jarre, impliquant un certain nombre de billes, est considéré comme le cumulatif linéaire d'un mouvement d'une seule bille.
- (2) Les équations proposées ne tiennent pas compte du facteur de glissement qui existe réellement au cours du processus de broyage mécanique [9].

(3) La bille colle à la paroi intérieure, et est ensuite accélérée par la jarre, prête pour le trajet suivant.

(4) La bille est considérée comme un point matériel de masse (m) [9]. La période de temps de 0 à t_1 correspond à l'intervalle au cours auquel la bille se déplace de la position $P_0(x_0, y_0)$ à $P_1(x_1, y_1)$. A tout instant (t) au cours de cette période, la position des vecteurs x et y de la bille peut être exprimé comme [13] :

$$x = r_d \cos \Omega t + r_v \cos(\Omega - \omega) t. \quad (2.1)$$

$$y = r_d \sin \Omega t + r_v \sin(\Omega - \omega) t. \quad (2.2)$$

Ainsi, les composantes des vitesses respectives dans les directions x et y, soit v_x et v_y , peuvent être obtenu.

$$V_x = dx/dt$$

$$= -\Omega r_d \sin \Omega t - (\Omega - \omega) r_v \sin(\Omega - \omega) t \quad (2.3)$$

$$V_y = dy/dt$$

$$= \Omega r_d \cos \Omega t + (\Omega - \omega) r_v \cos(\Omega - \omega) t \quad (2.4)$$

Les forces physiques appliquées à la bille sont son poids (action gravitationnelle) et la réaction de la jarre. Le poids de la bille est négligeable par rapport à la réaction de la jarre. Sur la base du principe fondamental dynamique, à l'instant $t = t_1$, la force centrifuge F_c agissant sur la bille peut être obtenue, de la rotation de la jarre et le disque (F_v et F_d) et pointe vers l'axe de la jarre:

$$F_c = F_v - \cos \gamma F_d \quad (2.5)$$

$$F_d = m r_d \Omega^2 \quad (2.6)$$

$$F_v = m r_v \omega^2 \quad (2.7)$$

$$\gamma = \pi - \phi \quad (2.8)$$

Remplacer les équations (2.6) et (2.8) dans l'équation (2.5), nous obtenons:

$$F_c = m r_v \omega^2 + \cos \phi m r_d \Omega^2 \quad (2.9)$$

La bille de broyage se détache de la paroi de la jarre lorsque $f_c \leq 0$, soit l'angle de rotation de décollage ϕ_1 satisfait :

$$\cos \phi_1 = \frac{r_v (\Omega - \omega)^2}{r_d \Omega^2} \quad (2.10)$$

Le temps nécessaire au cours du mouvement de la position $P_0 (x_0, y_0)$ à $P_1 (x_1, y_1)$ peut être exprimé comme :

$$t_1 = \frac{\phi_1}{\omega} \quad (2.11)$$

La vitesse de décollage (v) de la bille de broyage à la position $P_1 (x_1, y_1)$ est exprimée par la relation suivante:

$$v = \sqrt{\Omega^2 r_d^2 + (\Omega - \omega)^2 r_v^2 + 2\Omega (\Omega - \omega) r_v r_d \cos \phi_1}. \quad (2.12)$$

Les vecteurs de position pour le décollage et la collision de points $P_1 (x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$ sont pertinentes comme suit:

$$(x_2 - x_{c2})^2 + (y_2 - y_{c2})^2 = (x_1 - x_{c1})^2 + (y_1 - y_{c1})^2. \quad (2.13)$$

La bille de broyage se déplace dans une ligne droite, et $P_2 (x_2, y_2)$ est donnée par :

$$x_2 = x_1 + v_x t_2 \quad (2.14)$$

$$y_2 = y_1 + v_y t_2 \quad (2.15)$$

L'équation (13) peut être changée en une équation non linéaire avec un paramètre inconnu t_2 , soit :

$$v^2 t_2^2 + 2(x_1 v_x + y_1 v_y) t_2 - 2[x_1 r_d \cos(\phi_1 + \Omega t_2) + y_1 r_d \sin(\phi_1 + \Omega t_2)] - 2 t_2 [v_x r_d \cos(\phi_1 + \Omega t_2) + v_y r_d \sin(\phi_1 + \Omega t_2)] + 2(x_1 x_{c1} + y_1 y_{c1}) = 0 \quad (2.16)$$

L'angle entre la vitesse de décollage (v) au point $P_2 (x_2, y_2)$ et la direction radiale de la jarre peut être décrit comme suit:

$$\phi = \beta - \alpha \quad (2.17)$$

Où β est l'angle entre le rayon $C_2 P_2$ et la ligne horizontale, c'est-à-dire:

$$\beta = \text{tg}^{-1} ((y_2 - Y_{C2}) / (x_2 - x_{C2}))$$

• α : est l'angle entre la vitesse v et la ligne horizontale, c'est à dire :

$\alpha = \text{tg}^{-1} (v_y / v_x)$. En substituant les formules ci-dessus dans l'équation (17), nous avons:

$$\phi = \text{tan}^{-1} \left(\frac{y_2 - Y_{C2}}{x_2 - x_{C2}} \right) - \text{tan}^{-1} \left(\frac{v_y}{v_x} \right) \quad (2.18)$$

Le cycle dynamique de la bille de broyage commence à partir du moment où il se détache de la paroi de la jarre. Après un certain temps de circulation t_2 , la bille de broyage adhère à la paroi de la jarre pour un certain temps t_1 . Puis, le ballon se détache de la paroi de la jarre et pénètre dans le cycle de fonctionnement suivant. Le temps total pour un cycle complet de mouvement des billes peut être calculée en fonction de

$$T_{\text{cycle}} = t_1 + t_2 \quad (2.19)$$

La fréquence du mouvement bille : $f = 1/T_{\text{cycle}}$ (2.20)

L'énergie cinétique de la bille de broyage peut être calculée par:

$$E_c = \frac{1}{2} m_b v_r^2 \quad (2.21)$$

v_r : la vitesse relative de la bille de broyage dans la jarre, qui peut être calculée par:

$$v_r = |v_j - v_{\text{décollage}}| \quad (2.22)$$

v_{pi} : le vecteur vitesse de la jarre en position $P_2 (x_2, y_2)$.

$v_{\text{décollage}}$: le vecteur vitesse de la bille de broyage en position $P_2 (x_2, y_2)$.

La puissance d'impact de la bille de broyage est donnée comme suit:

$$P_t = f \cdot E_t \quad (2.23)$$

2.4.4- Un modèle pour le transfert d'énergie locale au cours du processus de broyage :

Dans le modèle illustré dans la référence [1], une collision peut se produire sur

une plage d'angles d'impact, et cette caractéristique géométrique pourrait avoir un effet important sur les tendances relatives à la coalescence et la fragmentation de la poudre. Par exemple, plusieurs types de fracture peuvent se produire, en fonction de l'angle d'impact, la collision normale, la friction de cisaillement... etc

Les particules de poudres piégées entre les billes en collision subissent une déformation plastique, qui les aplatit.

Sous l'effet cumulatif de broyage à 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, différents types de forces peuvent être classés. La force de la collision normale (F_n) et la force de cisaillement (F_t).

La théorie de l'impact de Hertz est appliquée à des collisions qui se produisent pendant le traitement mécano-chimique (MC). Ainsi, le temps d'impact (τ), le rayon d'impact (r_0), et la déformation de la bille de broyage à la compression maximale (δ_{max}), ainsi que la pression d'impact normal (P_n) et l'épaisseur (t_0) de poudre, peuvent être calculés sur la base de la formule suivante [1]:

$$\tau = g_\tau V^{-0.2} \left(\frac{\dots}{E} \right)^{0.4} r_b \quad (2.24)$$

$$r_0 = g_r V^{0.4} \left(\frac{\dots_s}{E} \right)^{0.2} r_b \quad (2.25)$$

$$\delta_{max} = r_0^2 / 2r_b \quad (2.26)$$

$$P_n = g_p V^{0.4} E (\rho/E)^{0.2} \quad (2.27)$$

Où :

g_τ , g_r , et g_p : des coefficients en fonction de la géométrie de collision. Leurs valeurs sont indiquées dans le tableau 1 pour certaines configurations MC communes;

V : la vitesse d'impact normal des billes de broyage;

E : le module de Young;

r_b : le rayon des billes de broyage;

D_m : le diamètre de la jarre;

ρ et ρ_p : les densités des billes de broyage et la poudre, respectivement;

La force d'impact normale F_n peut être donnée par:

$$F_n = P_n \pi r_0^2. \quad (2.28)$$

Ainsi, l'énergie élastique d'impact E_e et la puissance effective P_e peuvent être exprimées respectivement comme suit:

$$E_e = \frac{\pi \rho_n^2 r_0^2 \delta m}{6E} \quad (2.29)$$

$$P_e = f E_e \quad (2.30)$$

Tableau 2.1: Constantes géométriques pour les configurations de broyeur.

Type de collision	g_τ	g_r	g_p
Bille /bille	5.5744	0.9731	0.4646
Bille/surface plate	6.4034	1.4750	0.3521

2.4.5- Applications des modèles de trajectoire et de l'énergie

A. Simulation de l'effet de la vitesse de rotation du disque sur des paramètres cinétiques

La variation du rapport ω / Ω varie de [1-2], couvrant toutes les applications de billes de broyage classiques. Tandis que la vitesse de rotation des gammes de disques de

[200-900] (tr/m). Les paramètres de fonctionnement de configuration et paramètres physiques interdépendants sont présentés dans le tableau 2.

La figure (2.7) représente les variations de la fréquence de collision f , l'énergie cinétique totale de la bille de broyage E_t , et la puissance de collision P_t en fonction de Ω .

Comme le montre la Figure (2.7), les valeurs de f , E_t , et P_t augmentent de façon monotone avec Ω . Plus précisément f augmentent linéairement, tandis que E_t et P_t montrent une augmentation parabolique [13]. Les tendances de variation de P_t et E_t sont similaires à celles du rapport ω / Ω . C'est-à-dire, les valeurs de P_t et de E_t manifestent une augmentation monotone avec le rapport ω/Ω . C'est parce que pour une donnée Ω , l'augmentation de la vitesse de rotation de la jarre améliore l'apport d'énergie à la bille de broyage.

Tableau 2.2 : Les paramètres de fonctionnement de configuration et paramètres physiques interdépendants.

Ω (tr/mn)	ω/Ω	r_d /mm	r_v /mm	r_b /mm	L /mm	ρ /g.cm ⁻³	m_b /g	E /G.PA
200-900	1.00	65	20	4.9	40	7.77	3.6	210
	1.25							
	1.50							
	1.75							
	2.00							

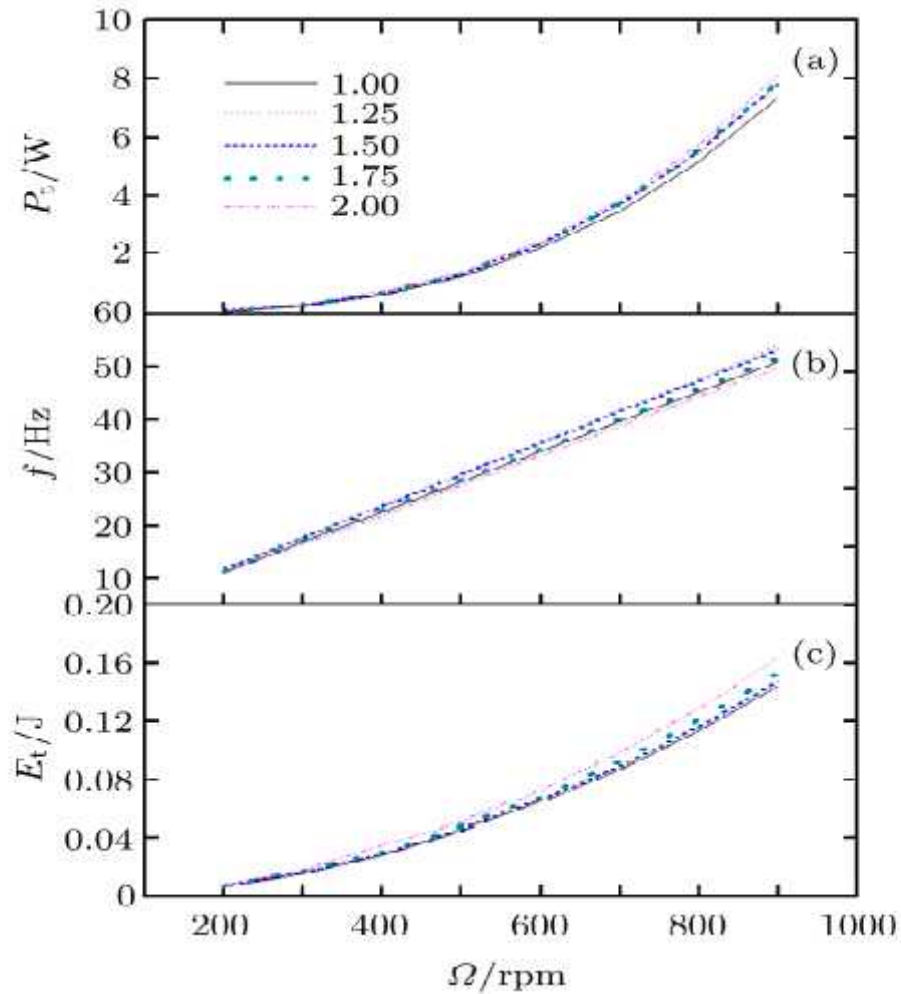


Figure 2.8. (a): Variations de la puissance de collision P_t , (b) : la fréquence de collision f , (c): l'énergie cinétique totale E_t en fonction de la vitesse de rotation du disque planétaire Ω pour différents niveaux de rapport de vitesses jarre / disque ω / Ω .

Il y'a une différence dans la variation de P_t avec ω entre le rapport de Chattopadhyay ; et le résultat de la simulation présente : P_t dépend évidemment de ω plutôt que de E_t dans les recherches ancienne, tandis que dans le second cas, P_t et E_t manifestent une légère augmentation avec ω , qui peut être dû au fait que le rapport $\omega/\Omega > 1$.

B. Simulation de l'influence du rapport ω / Ω sur les paramètres cinétiques

Il a été établi que la bille de broyage devient adhérente à la paroi de la jarre, sans roulement ou de glissement sur la paroi intérieure, lorsque la valeur de ω / Ω est soit inférieure à 0,7 ou supérieur à 3,17. Par conséquent, nous nous concentrons sur la

variation de ω / Ω dans une gamme de 0,7 à 3,17. En outre, la vitesse de rotation du disque varie de 200 à 900 tr/min, et les valeurs d'autre paramètre approprié sont résumées dans le tableau 3. Comme le montre la Figure. 7, la vitesse de collision V manifeste une augmentation progressive à la fois avec Ω et ω / Ω , ce qui est cohérent avec les variations de E_t et P_t , comme indiqué au dessus. Comme le rapport ω / Ω augmente, l'angle entre la direction de l'impact et la paroi et de la jarre diminue progressivement à partir de 90° à 0° à $\omega/\Omega = 2,17$, et augmente progressivement jusqu'à ce qu'elle devienne perpendiculaire à la paroi de la jarre, puis diminue à nouveau jusqu'à ce qu'il soit tangentiellement adhérente à la paroi de la jarre. Lorsque $\omega / \Omega > 3,179$, la bille de broyage décolle de la paroi de la jarre pour se déplacer dans la jarre, puisque la force centrifuge provenant de la rotation de la jarre est beaucoup plus grande que celle du disque. Ainsi, l'angle de collision dépend essentiellement de ω / Ω . La trajectoire cinétique de la bille de broyage est défini pour un rapport donné ω / Ω , tandis que la vitesse de collision est déterminée par Ω et ω/Ω

Selon les résultats rapportés précédemment, les variations de certains paramètres cinétiques, y compris f , E_t , P_t et P_n avec Ω sont similaires. Ainsi, les variations de ces paramètres avec ω/Ω peuvent être étudiées pour une donnée Ω .

Comme le montre la Figure (2.8), le calcul de simulation est effectué à $\Omega = 800$ tr/mn. Les valeurs de V_r et P_t augmente de façon monotone avec ω / Ω . Puisque la vitesse de rotation de la jarre augmente progressivement avec ω / Ω , V_r et P_t augmentent avec l'énergie cinétique d'entrée du système. Alors que les tendances croissantes de V_r et P_t sont différentes puisque la fréquence de collision augmente de façon non-monotone.

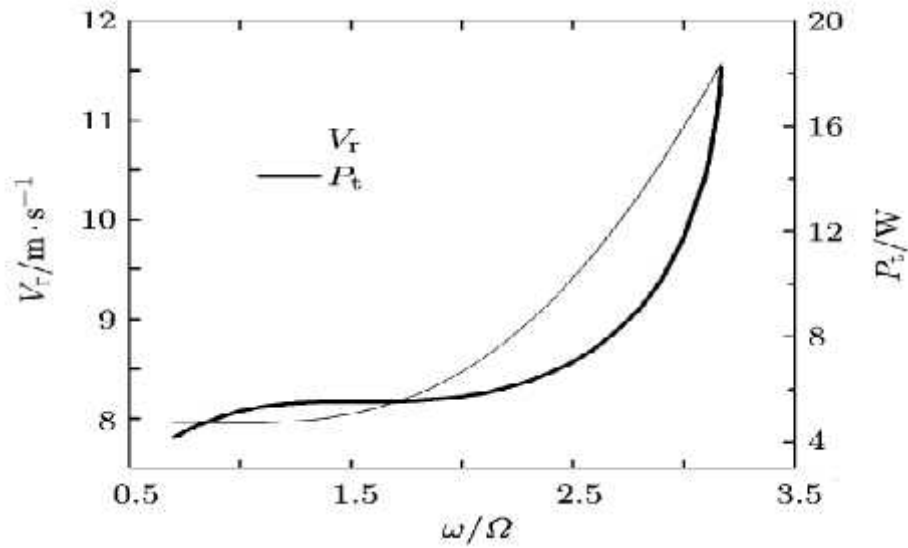


Figure 2.9. Les relations entre la vitesse de collision v_r , la fréquence collision, la puissance collision P_t , et le rapport de vitesse jarre sur le disque ω / Ω à $\Omega = 800$ tr/mn.

Tableau 2.3. Les valeurs du paramètre de fonctionnement.

Ω (tr/mn)	ω/Ω	r_d /mm	r_v /mm	r_b /mm	L/mm	n_B	ρ_B /g.cm ⁻³	m_b /g	E_{eff} /G.PA
200-900	0.7-3.17	65	20	4.9	40	1	7.77	3.6	210

La puissance effective P_e par l'impact est un paramètre important pour mesurer l'énergie cinétique transférée par la bille, ce qui affecte grandement la poudre par une collision, ce qui conduit à la réaction mécano.

Le rendement de conversion η_t reflète le rendement de conversion à partir de la puissance totale à la puissance effective: $\eta_t = \frac{P_e}{P_t} \cdot 100\%$.

Sur la Figure (2.9), P_e augmente en douceur avec (ω/Ω) dans un premier temps, et atteint son premier pic pour une valeur de $(\omega/\Omega) = 1,15$. Ensuite, elle diminue à sa valeur minimale pour $(\omega/\Omega) = 2,17$ et augmente une seconde fois pour la valeur $(\omega/\Omega) = 2,86$. Enfin, il diminue rapidement malgré l'augmentation monotone de la puissance totale avec ω / Ω , il existe deux pics du rendement de conversion η_t , qui existent à proximité des deux pics de P_e , respectivement.

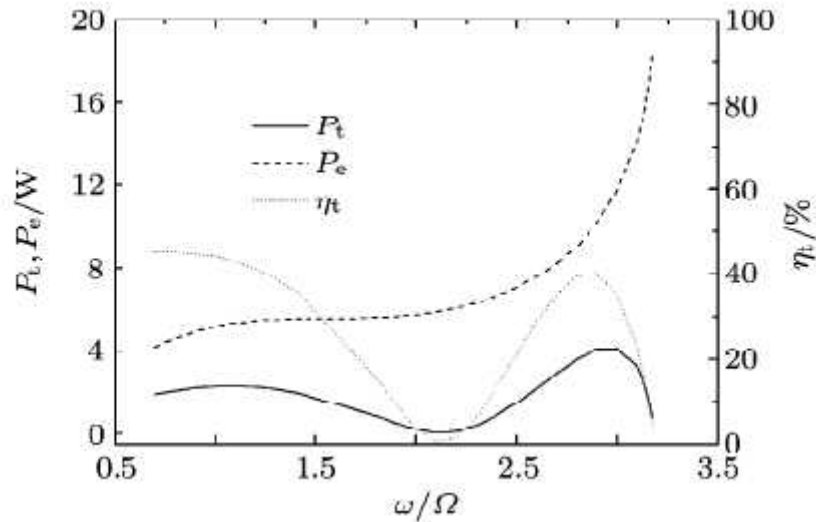


Figure 2.10. Les relations entre l'énergie cinétique totale P_t , la puissance effective P_e , et le rapport de vitesse jarre sur le disque ω / Ω à $\Omega = 800$ tr/m.

Du point de vue théorique, l'état de fonctionnement optimal devrait être choisi pour $(\omega/\Omega) = 1,15$ ou $2,86$ pour obtenir la plus haute énergie d'impact. Cependant, puisque les vitesses de rotation du disque et de la jarre sont généralement dans un rapport fixe sur les broyeurs planétaire à billes, le rapport (ω/Ω) doit être inférieur à 2. Les broyeurs à billes classiques [49], E.G. Fritsch P5 et P7 Retsch, ont respectivement $(\omega/\Omega) = 1,25$ et $(\omega/\Omega) = 1$, et obtenir ainsi une énergie à fort impact.

2.5- Conclusions

Les modèles de trajectoire et de l'énergie présentés ici illustrent les relations entre les paramètres cinétiques et dynamiques. Les effets de la vitesse de rotation du disque Ω et le rapport des vitesses jarre sur disque (ω/ Ω) sur d'autres paramètres cinétiques ont été étudiés. Tous les paramètres cinétiques augmentent de manière monotone avec l'augmentation de la vitesse de rotation Ω et du rapport (ω/Ω) .

3.1 Introduction :

Il existe de nombreux types de broyeurs pour nanomatériaux sur le marché, sachant que chaque type de broyeur a ces avantages et ces inconvénients.

On prend par exemple le broyeur planétaire, du point de vue technique il consomme beaucoup d'énergie, et les billes contaminent la poudre, comme il nécessite beaucoup de temps pour parvenir à des résultats à l'échelle nanométrique. Et du point de vue théorique l'étude cinématique de ce broyeur est difficile se qui implique l'impossibilité de garantir les résultats vue que le mouvement des billes est aléatoire.

Théoriquement, Notre broyeur qui est agité par un système bielle manivelle, offre un meilleur contrôle du broyage, et moins d'énergie a consommé vue qu'il n y a qu'une seule bille à manipulé.

En développera dans cette partie du chapitre la cinématique du broyeur proposé en discutant le mécanisme et en démontrant la course de la jarre, sa vitesse, ainsi que son accélération.

Dans ce chapitre on montre le mécanisme de broyeur proposé et sa modélisation mathématique en démontrant la course de la jarre, sa vitesse, ainsi que son accélération.

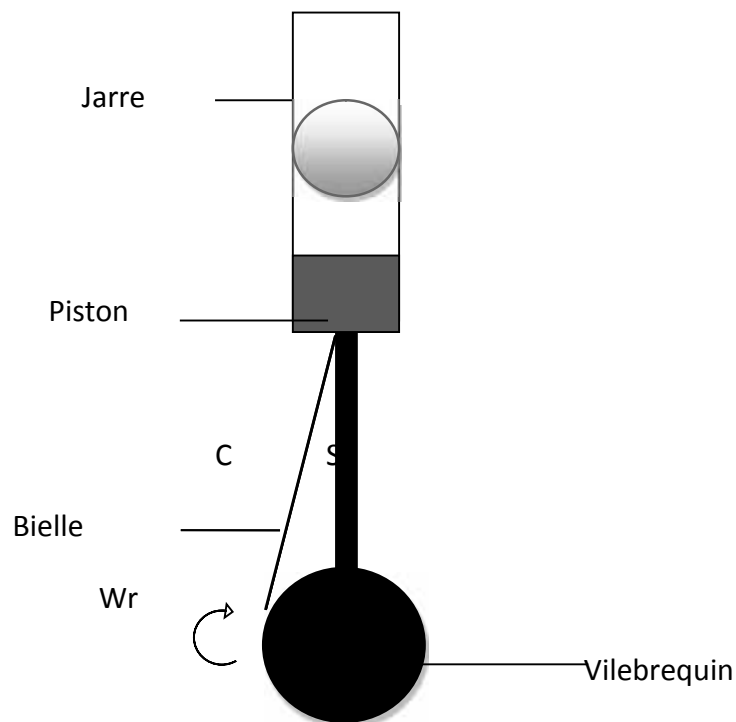


Figure 3.1 : Schéma du broyeur à système bielle-manivelle

3.2. Conception et principe de fonctionnement du broyeur :

Pour notre étude, nous proposons un broyeur constitué d'une jarre animé par un système bielle manivelle (Figure 3.2), le matériau à broyé se trouve sous la forme de poudres. Il est placé dans une jarre, avec une bille d'un matériau dur.

En agitant la jarre, la bille se met en mouvement ce qui provoque des collisions entre la paroi de la jarre et elle-même. La poudre prise entre ces éléments, peut être fracturée en grains de poudres plus petits.

Le mouvement de la bille est imposé par une mise en translation de la jarre contenant la poudre et la bille.

Cette jarre relié sur la bielle (le haut de la bielle) d'un système bielle manivelle. Ce dernier transforme le mouvement rotatif du moteur en mouvement rectiligne alternatif.

Le parcours de la jarre (S_p) est Limité par un point mort haut et un point mort bas. La jarre et la bille utilisées sont en acier inoxydable.

3. 3. Considérations préliminaires:

Les mouvements de la jarre, de la bille et de la poudre pour produire une énergie d'impact sont complexes à modéliser.

Afin de réduire la complexité de la situation, nous adopterons les remarques ci-dessous.

- On négligera le mouvement de la poudre en raison de leurs propriétés physiques, qui sont principalement très petite, avec des déplacements mineurs et ont plutôt tendance à s'emballer sur le fond de la jarre.
- On négligera l'énergie produite par les particules de la poudre qui sont en collision les unes avec les autres. Chaque collision se traduira par la dissipation d'énergie cinétique et forme ainsi un mécanisme cinétique d'amortissement.
- On négligera une partie de l'amortissement de la bille lors de l'impacte avec la poudre.

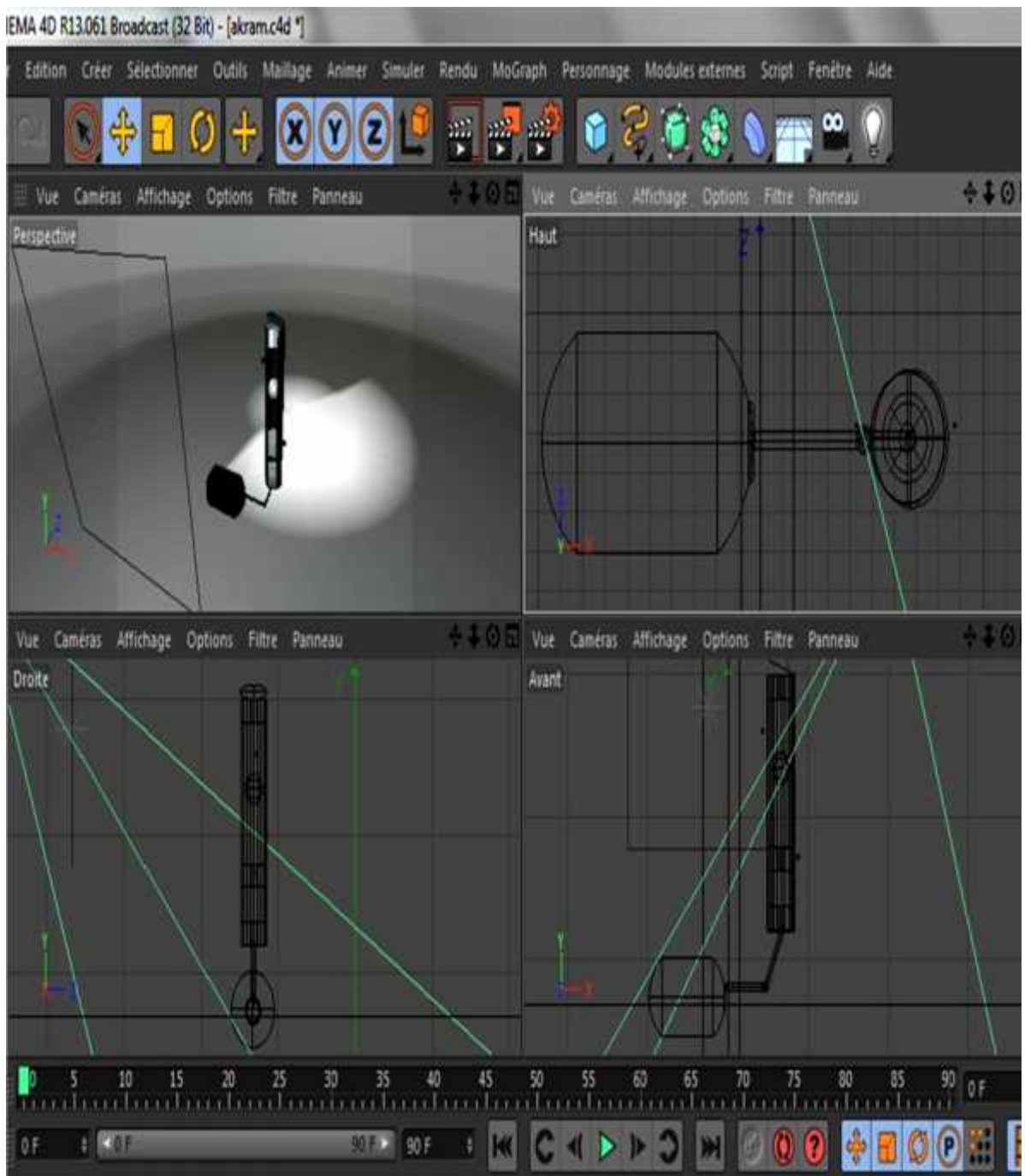


Figure 3.2 Broyeur bielle-manivelle en 3DS, faite avec le logiciel 3D max

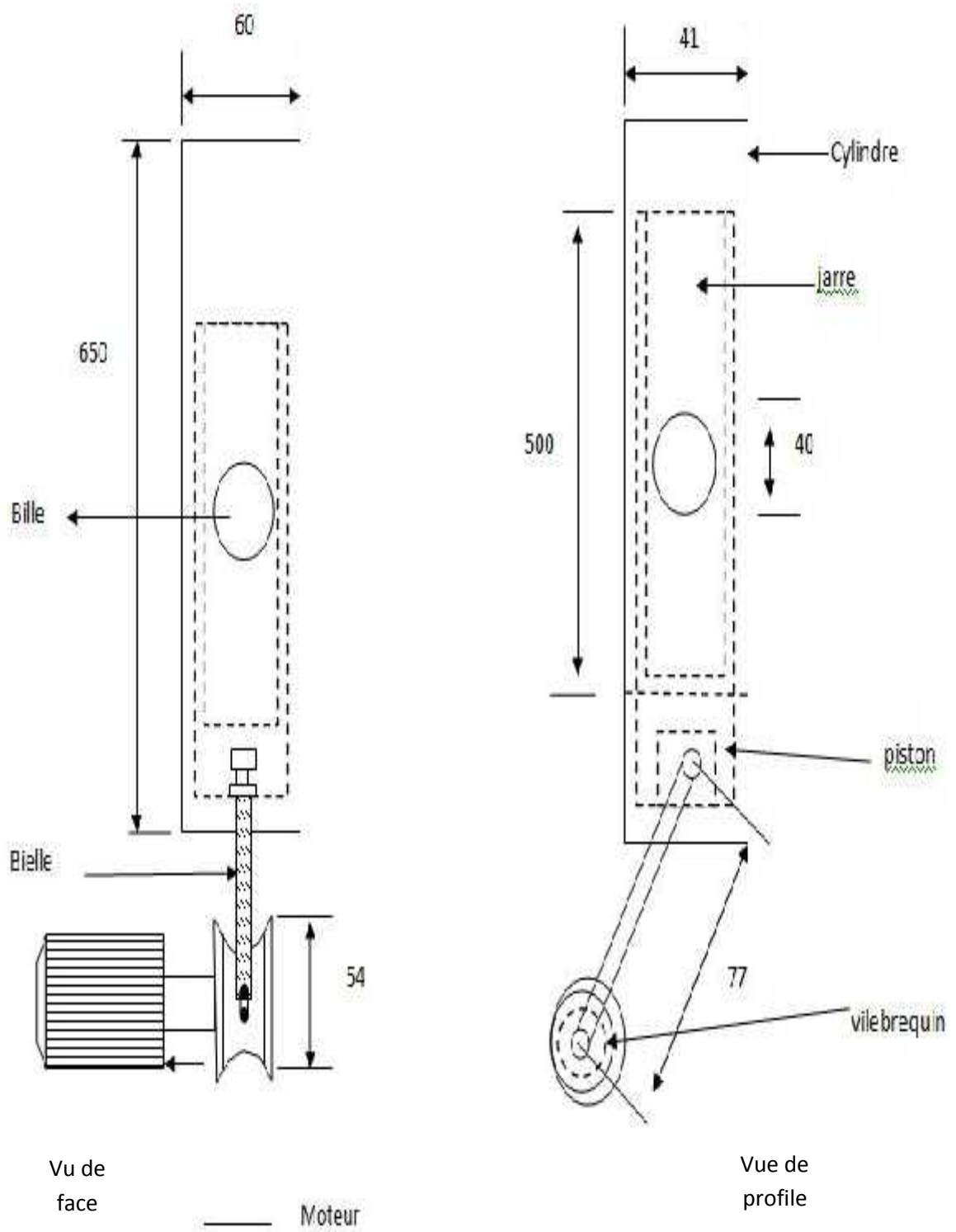


Figure 3.3: Schéma du Modèle de conception du broyeur bielle-manivelle.

3.4 Usure et choix de la bille :

L'usure des billes est un problème crucial. En effet, les billes de broyage subissent aussi les conséquences des collisions (déformations, vibrations et échauffement). Les éclats de billes, créés par abrasion, peuvent se retrouver parmi les fragments de particules et polluer la poudre à broyer.

Pour de nombreuses applications industrielles, la contamination par les billes peut avoir un effet très négatif sur la qualité du produit, en termes de pureté et de propriétés fonctionnelles.

Le choix du matériau constitutif des billes est ainsi parfois déterminé en fonction de l'application industrielle.

Pour la production des poudres nanométriques pour l'aéronautique, pour les impuretés des produits formés n'est évidemment pas admissible. Pour le broyage des poudres d'aluminiums et de titanes, de nombreuses valeurs uniques offertes par l'acier inoxydable en font un candidat puissant dans le choix du matériau de la bille.

La bille en acier inoxydable est dotée d'une haute dureté mécanique et d'une grande résistance à la corrosion, et à la température.

Diamètre et masse de la bille :

La masse est égale à : $m = \rho * V$ (3.1)

Avec : $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$

Avec : $V = \frac{4}{3} * \pi * r_b^3$ (3.2)

Le rôle de la bille: Le rôle dominant dans le processus du broyage mécanique est également pris par la bille. C'est la bille qui éprouve l'effet du mouvement de la jarre.

3.5 SYSTÈME BIELLE-MANIVELLE :

Le système bielle-manivelle permet la transformation d'un mouvement circulaire continu en mouvement rectiligne alternatif (application aux pompes, compresseurs

alternatifs,...) et réciproquement mouvement rectiligne alternatif en mouvement circulaire continu (application aux moteurs à pistons) [35]:

La figure ci-dessous présente le principe.

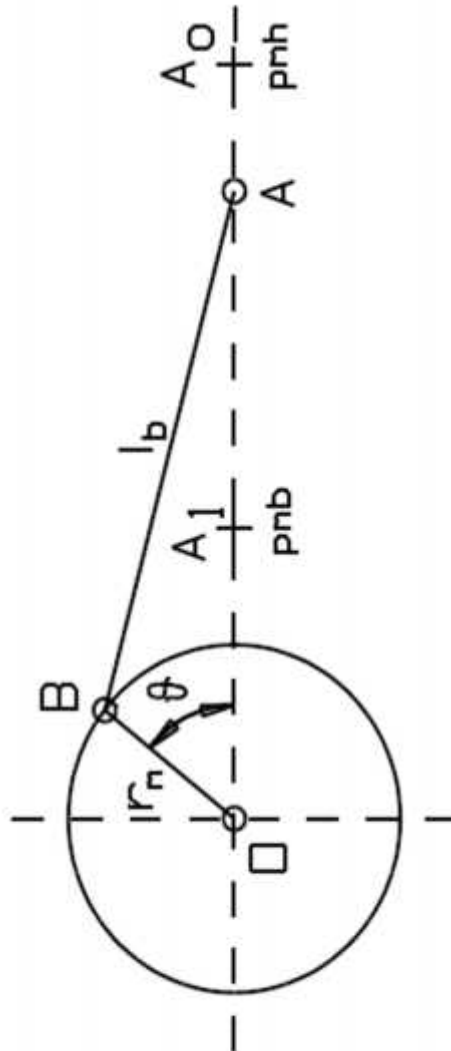


Figure 3 .4 : Principe de fonctionnement d'une Bielle manivelle

OB : représente la "manivelle" de rayon r , qui est entraînée par la vitesse angulaire :

$$w = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

AB : représente la "bielle" de longueur C , A est appelé "pied de bielle" et B est appelé "tête de bielle".

(PMH)= représente le Point Mort Haut.

(PMB)= représente 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".

3.5.1 Étude analytique du mouvement :

Le déplacement (S_p) est dû à la rotation du rayon (r).

La figure suivante (3.5) représente la modélisation schématisée du système bielle-manivelle

Avec : pmH : point mort haut.

pmB : point mort bas.

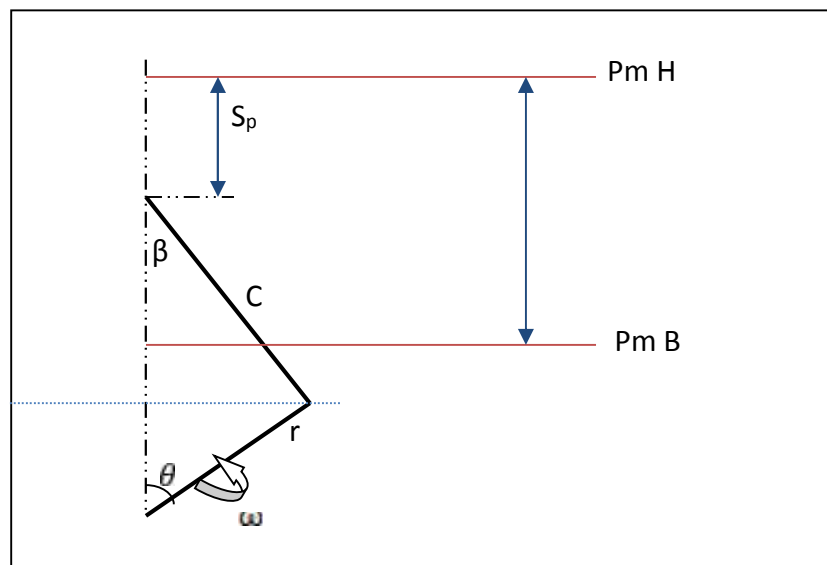


Figure 3.5 : Modélisation cinématique du broyeur à mécanisme bielle-manivelle

Dans ce qui suit on détermine les équations du mouvement de la jarre.

On utilisant le modèle mathématique mis au point pour le mécanisme, le comportement de la bille et les mouvements de la jarre sont simulés en utilisant les logiciels MATLAB et FORTRAN.

Les valeurs des paramètres utilisées pour la simulation sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Les paramètres d'entrée de la simulation.

Longueur de la bielle, c	77mm
Rayon de la manivelle, r	27mm
Diamètre du piston	60mm
Le déplacement du piston, s_p	50mm
Vitesse angulaire, ω	857tr/mn, 1000tr/mn
La masse et le diamètre de bille	0.263 kg et 40mm

Détermination de l'équation du mouvement :

D'après la loi trigonométrique $c \sin \beta = r \sin \theta$ (3.3)

Pour simplifier la résolution, On travaille avec une seule inconnue: θ

D'après la figure 3.3

$$\longrightarrow S = r \cos \theta + c \cos \beta \quad (3.4)$$

On a: $\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1$

$$\longrightarrow \cos^2 \beta = (1 - \sin^2 \beta)$$

Alors : $\sin^2 \beta = \frac{r^2}{c^2} \sin^2 \theta$ (3.5)

On remplace (3.5) dans (3.4) on obtient alors:

$$\longrightarrow S = r \cos \theta + c \sqrt{1 - \frac{r^2}{c^2} \sin^2 \theta} \quad (3.6)$$

$$\longrightarrow S = r \cos \theta + \sqrt{c^2 - r^2 \sin^2 \theta} \quad (3.7)$$

On varie L'angle de rotation de la manivelle θ et en détermine la courbe de déplacement de la jarre, comme il est présentée dans la figure 3.6.

La jarre effectue un mouvement oscillatoire qui varie en fonction de l'angle θ , sa hauteur maximale est de 0,105 m.

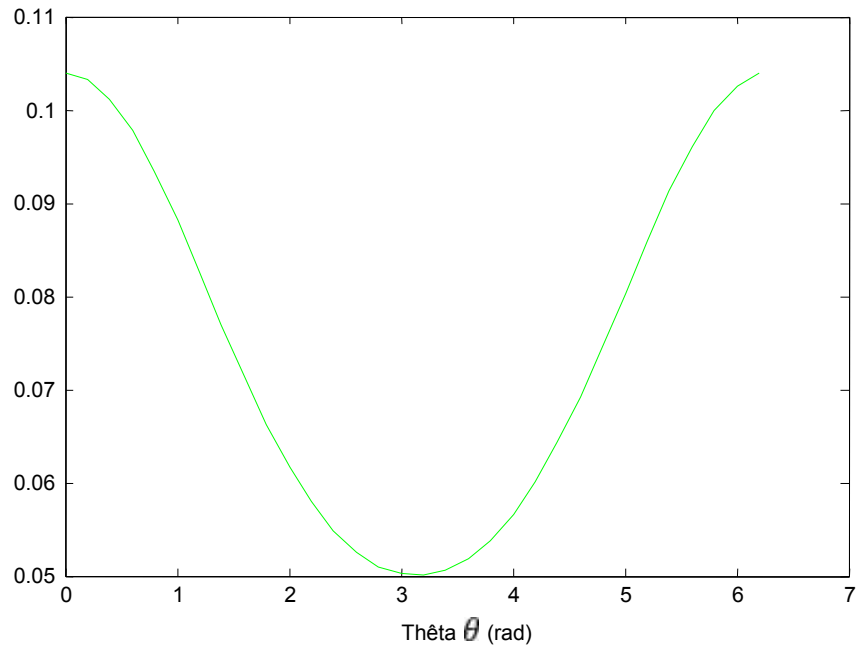


Figure 3.6 : Positions de la jarre en fonction de θ

En supposant que la manivelle est entraînée en rotation à une vitesse angulaire constante ω , l'angle du vilebrequin θ , Au temps t , est donnée par:

$$\theta = \omega t \quad (3.8)$$

Détermination de l'équation de la vitesse :

$$V = \frac{d}{dt} \quad (3.9)$$

$$\rightarrow V = \frac{d(r \cos \theta + c \sin \theta)}{dt} \quad (3.10)$$

$$\text{On a aussi :} \quad 2 \sin \theta \cdot c \omega = \omega \sin 2\theta \quad (3.11)$$

On remplace (3.11) dans (3.10) on aura :

$$\rightarrow V = -r \omega \sin \theta - \frac{r^2 \omega \sin 2\theta}{2\sqrt{c^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \quad (3.12)$$

La courbe de vitesse de la jarre change selon l'angle θ , la jarre atteint sa vitesse maximal qui est égale a 2,56(m/s) lorsque l'angle θ sera égal a 1,26 (rad), comme on le montre sur la figure (3.7).

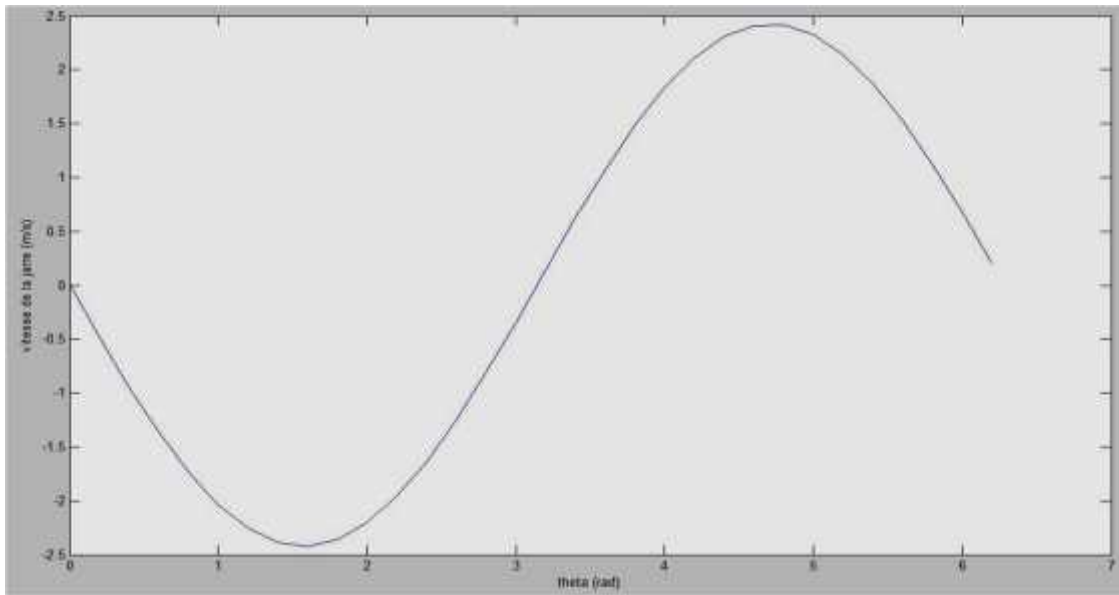


Figure 3.7 Variation de la vitesse de la jarre en fonction de theta

Détermination de l'accélération:

Concernant le calcul de l'accélération, elle est définie par la formule suivante:

$$a = \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (3.13)$$

$$a = \frac{\partial \left(-r \sin \theta - \frac{r^2 w \sin^2 \theta}{2\sqrt{c^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \right)}{\partial \theta} \quad (3.14)$$

En dérivant la fonction (3.14) nous obtenons la nouvelle formule de l'accélération:

$$a = -r w^2 \cos \theta - \frac{[2r^2 w^2 \cos \theta \cdot 2\theta \cdot 2(c^2 - r^2 \sin^2 \theta)^{-3/2}] - \left[\frac{r^2 w \sin^2 \theta \cdot c}{4(c^2 - r^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \right]}{4(c^2 - r^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \quad (3.15)$$

On aura donc :

$$a = -r w^2 \cos \theta - \frac{[4r^2 w^2 \cos \theta \cdot 2\theta (c^2 - r^2 \sin^2 \theta)^{-3/2} + (r^2 w \sin^2 \theta)^2]}{4(c^2 - r^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \quad (3.16)$$

Pour calculer la vitesse maximale de la jarre on cherche l'angle θ pour une valeur de l'accélération nulle.

On ne peut le faire analytiquement alors on fait une résolution numérique (à l'aide du fortran) qui nous donne une solution approximative.

On trouve $a=0$ lorsque $\theta \approx 1,26$ rad.

On vient de déterminer la courbe du piston, sa vitesse et son accélération

Puisque la jarre est montée sur la partie supérieure du piston, la longueur de déplacement de la jarre S_j , la vitesse la jarre V_j , et l'accélération de la jarre a_j , sont égaux aux déplacements S_p , la vitesse V_p , et l'accélération du piston a_p , respectivement ainsi:

- $S_j = S_p$
- $V_j = V_p$
- $a_j = a_p$

Notations :

a :	accélération angulaire	[rad/s ²]
r :	rayon	[m]
a :	Accélération normale	[m/s ²]
a_{tg} :	accélération tangentielle	[m/s ²]
w :	vitesse angulaire	[rad/s]
C :	longueur de la bielle	[m]
θ :	angle de rotation de vilebrequin	[rad]
β :	angle de rotation de la bielle manivelle	[rad]

3.5.2 La fréquence de la jarre:

T: la période d'un cycle

La fréquence f est donnée par l'inverse de temps $f=1/T$ (3.26)

Nous avons: $\theta = w \implies t = \theta/w$

Avec : $\theta = [0, 2\pi]$

Comme le montre la figure (3.8) notre broyeur fait environs 14 oscillations par seconde pour $w= 857$ tr/mn.

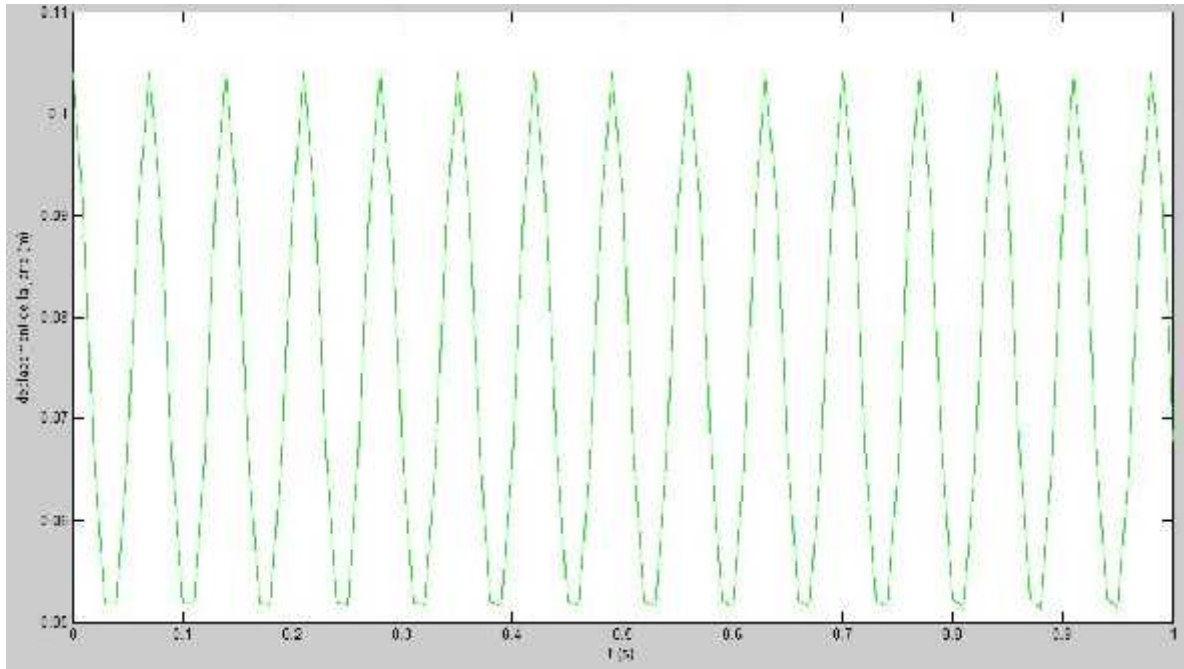


Figure 3.8 : Variation du déplacement en fonction du temps

Pour une Vitesse angulaire de 857 tour/minute, On trouve que la fréquence de la jarre égale a 14.3hz

Et pour une vitesse angulaire, $w=1000$ tour/mn, la fréquence de la jarre sera de 16,7hz.

On déduit que la fréquence est proportionnelle à la vitesse angulaire, on aura un broyage plus rapide en augmentant la vitesse rotatif.

3.6 Étude des conditions de décollage de la bille :

Comme la jarre se déplace vers le haut à partir de sa position la plus basse, comme indiqué sur la Figure (3.9.a), la bille, qui est un organe indépendant reposant au fond de la jarre se déplacera en même temps que la jarre à la même vitesse et accélération. La hauteur, h_b , la vitesse V_b , et l'accélération α_b , du mouvement de la bille sont exprimés ainsi:

$$S_j = S_b$$

$$V_j = V_b$$

$$\alpha_j = \alpha_b$$

Avant d'atteindre le sommet de son déplacement, la jarre commence à décélérer dans son mouvement vers le haut en raison de la nature du mouvement de la manivelle du système.

Puisque la bille est indépendante de la jarre, l'accélération de la bille et de la jarre va commencer à varier. Si l'accélération de la bille est supérieure à la pesanteur (gravité), ($A_b > g$) la bille va commencer à décoller de la jarre comme le montre la Figure (3.9.c). Le temps, t_1 , et la hauteur h_1 de la phase de décollage peut être exprimée comme suit:

$$t_1 = \theta / \omega \quad (3.18)$$

$$h_1 = r c_1 \theta + (c^2 - r^2 s^2 \theta)^{1/2} \quad (3.19)$$

Où: t_1 , est défini comme le temps de décollage de la bille.

h_1 : la hauteur de décollage de la bille, qui est égale à S_j à t_1 .

Après la phase de départ, la bille va continuer à se déplacer vers le haut individuellement comme il est indiqué dans la Figure (3.9.d). La vitesse de la bille, V_{bd} et la hauteur de la bille, h_{bd} peut être déterminée par:

$$V_{bd} = V_b + (-g) \quad (3.20)$$

$$h_{bd} = h_1 + V_b t + (1/2)(-g)^2 \quad (3.21)$$

L'équation (3.20) montre que, la vitesse de la bille V_{bd} , diminue en fonction du temps, en raison de l'accélération de la gravité, qui est dans la direction opposée, tandis que la hauteur de la bille après le décollage h_{bd} , augmente en fonction du temps (équation (3.21)).

Par conséquent, la bille va atteindre sa hauteur maximale h_{pic} , lorsque $V_{bd} = 0$.

Le h_{pic} et le temps d'atteindre h_{pic} , t_{pic} peuvent être déterminée par ses équations:

$$h_p = \left[\frac{V_b^2}{2g} \right] + h_1 \quad (3.22)$$

$$t_p = \left[\frac{V_b}{g} \right] + t_1 \quad (3.23)$$

Après avoir atteint le h_{pic} , la bille va tomber en chute libre sous l'influence de la pesanteur, comme on l'indique dans la Figure (3.9.f). La vitesse de la bille V_d , et la hauteur de la bille h_d en mouvement vers le bas peut être exprimée comme suit:

$$V_d = -g(t - t_p) \quad (3.24)$$

$$h_d = h_p - \frac{1}{2} g(t - t_p)^2 \quad (3.25)$$

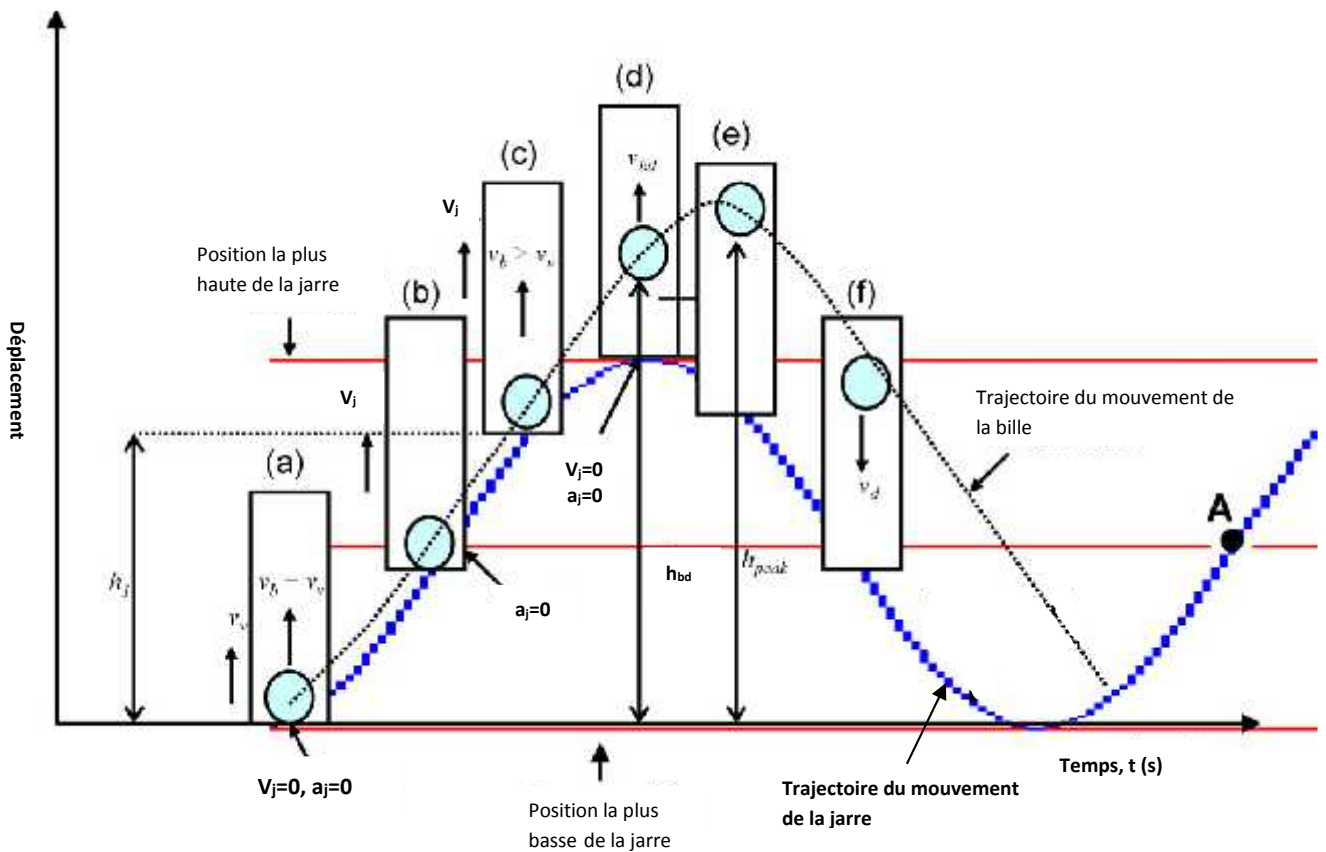


Figure 3.9 déplacement jarre et bille en fonction du temps

(b): la position de la jarre $S_j=0,08$ (m), et $v_j=2,56$ (m/s).

Après simulation sur Matlab, et suivant les équations précédentes on obtient les résultats suivant :

Tableau 3.2 : Temps et position de la bille à l'instant de décollage ainsi que la hauteur max de la bille et le temps pour l'atteindre pour les vitesses angulaire : 857tr/min et 1000tr/min

Vitesse angulaire ω	857 tr/min	Vitesse angulaire ω	1000 tr/min
hauteur de la phase de décollage (m)	0.0798	hauteur de la phase de décollage (m)	0.0798
Temps de la phase de décollage (s)	0.0145	Temps de la phase de décollage (s)	0.0124
hauteur maximale de la bille h_{pic} (m)	0.4091	hauteur maximale de la bille h_{pic} (m)	0.5281
le temps d'atteindre h_{pic} ; t_{pic} (s)	0.2711	le temps d'atteindre h_{pic} ; t_{pic} (s)	0.3119

3.7 Calculs des énergies:

3.7.1 Calcul de l'énergie d'impacte:

Étant donné que la jarre et la bille se déplacent individuellement à des configurations différentes, la collision entre eux pourraient se produire à l'endroit où la différence de position entre la bille H_d , et la jarre s_j , est égal à zéro.

Lors de la collision, le mouvement de la jarre ne serait pas affecté car la jarre est fixée sur le mécanisme à manivelle. En outre, le nouveau-déplacement de la bille en raison de la collision est considéré comme nul. Ainsi, l'énergie d'impact impliqué dans la collision est définie comme suit:

$$E_i = \frac{1}{2} m (V_d - V_j)^2 \quad (3.27)$$

m : masse de la bille en kilogramme (kg);

V_d : vitesse de la bille en mètre par seconde (m/s);

V_j : vitesse de la jarre en mètre par seconde (m/s);

E_i : énergie d'impact en Joule (J);

3.7.2 Calcul de l'Énergie de choc modifiée:

L'analyse effectuée par D.R.Maurice et T.H.Courtney [42], montre que la collision est souvent accompagnée d'une petite fraction Ψ de perte d'énergie. Ainsi, l'énergie de choc modifiée produite est:

$$U_p = \Psi E_t \quad (3.28)$$

Ψ : Coefficient de déformation du matériau qui dépend des caractéristiques de la poudre ayant une valeur inférieure à 1.

Puisque m est constante, l'énergie d'impact générée par la collision est fortement influencée par la différence entre la vitesse de la jarre et la vitesse de la bille. Il est évident que l'énergie d'impact maximale serait naturellement située au point A (figure 3.8). C'est parce que, à ce stade, la vitesse de la jarre est au maximum et en sens inverse avec la vitesse de la chute de la bille. L'échelle de l'énergie d'impact générée au niveau de ce point varie en fonction de la hauteur de la trajectoire de la bille, l'amplitude et de la fréquence d'oscillation de la jarre.

Plus l'amplitude de la bille augmente plus l'énergie d'impact produite est importante.

3.8 Simulation du déplacement de la bille :

La position de la bille en fonction du temps dans son mouvement ascendant et descendant exprimé à partir des équations (3.21) et (3.22) sont représenté dans la figure suivante :

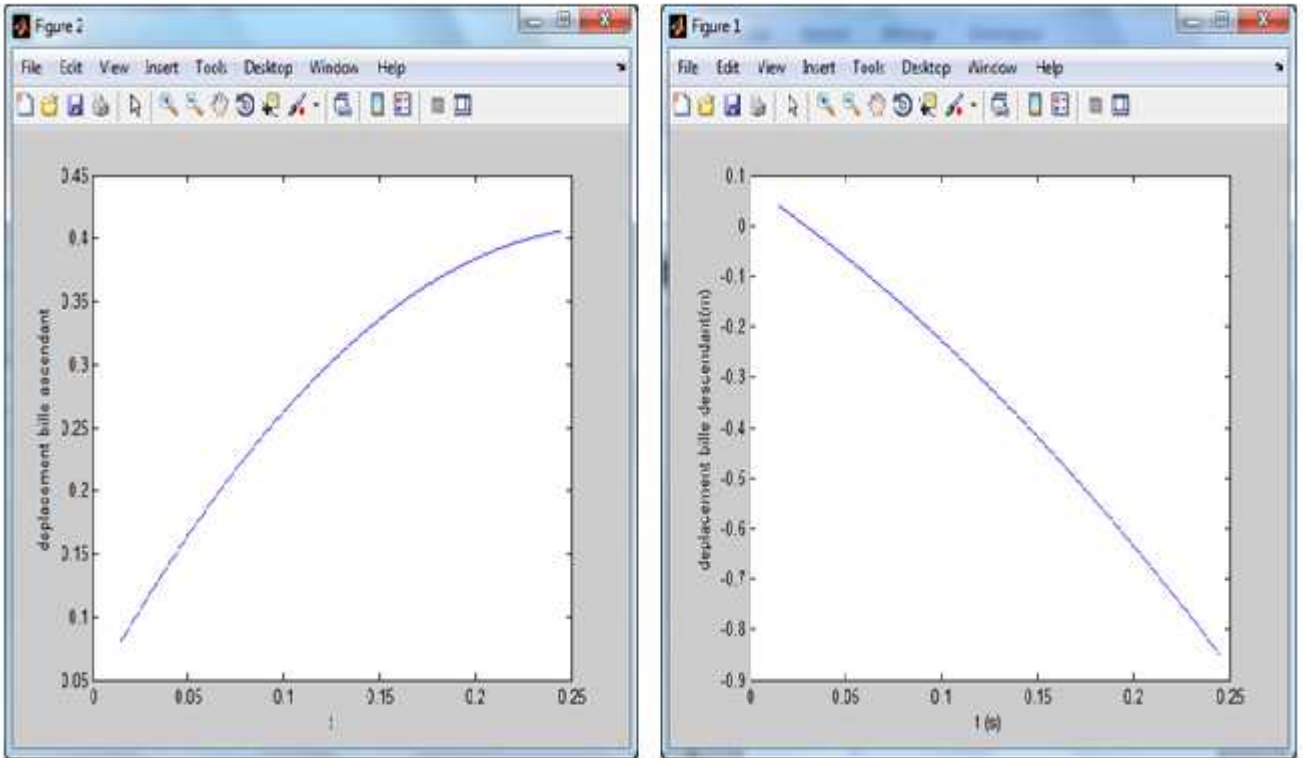


Figure 3.10 Position ascendante et descendante de la bille en fonction du temps

Les positions de la jarre et la bille le long de la direction verticale en fonction du temps sont représentés si dessous:

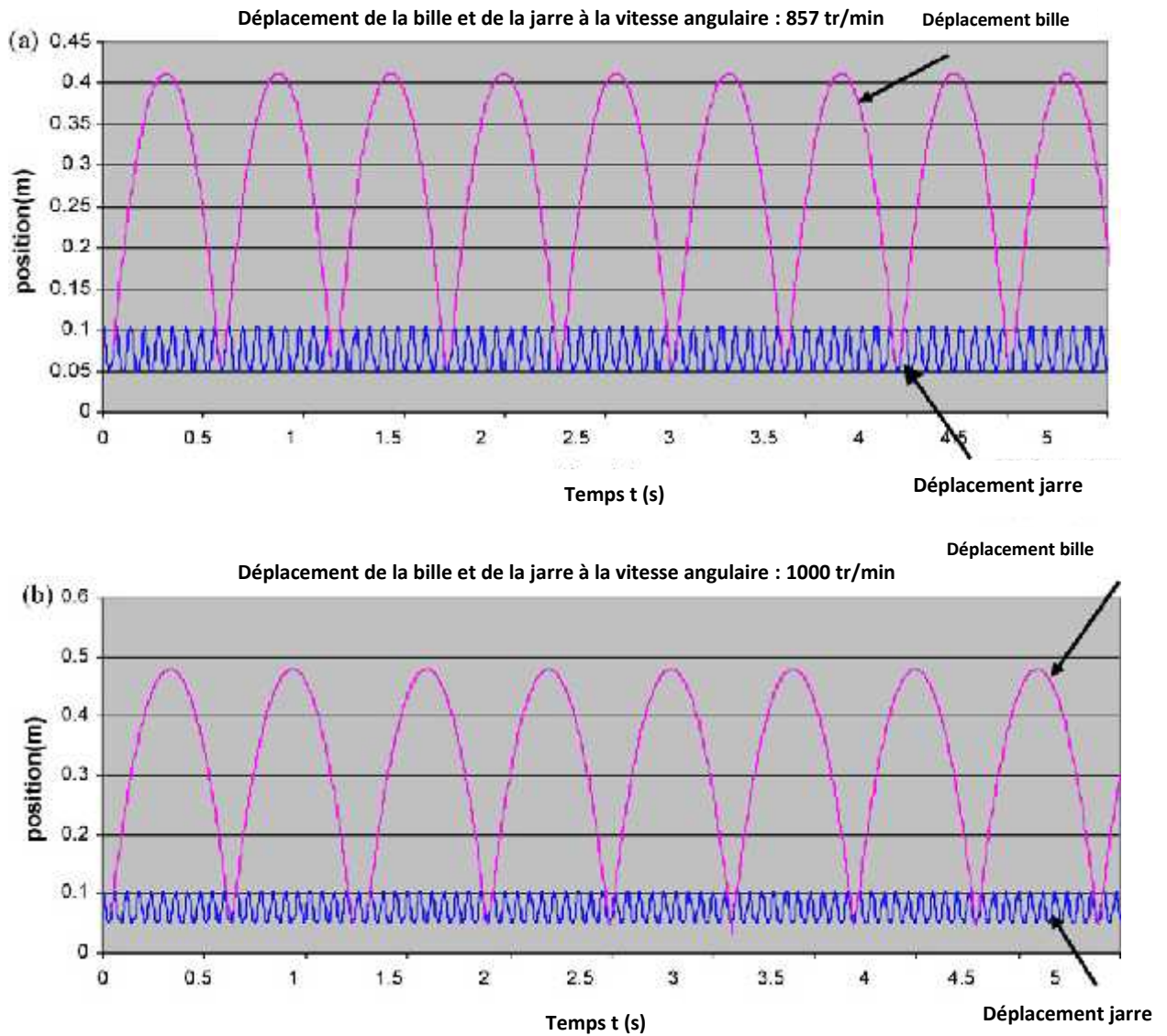


Figure 3.11: Position de la bille et de la jarre en fonction du temps dans les deux cas de vitesse angulaire (a) $\omega = 857$ tr/mn et (b) $\omega = 1000$ tr/mn.

Les Figures 3.11 (a) et (b) représentent les mouvements de la jarre et de la bille en fonction du temps à des vitesses de rotation de la manivelle de 857 et 1000 tours par minute. Puisque la jarre est fixée sur la partie supérieure du piston, le déplacement maximal de la jarre est égal au déplacement du piston à n'importe quelle vitesse angulaire dans la même fréquence. Sachant que la bille est un organisme indépendant de la jarre, il a été constaté que le déplacement de la bille maximale est plus long que le

déplacement maximal de la jarre. Ce qui rend la fréquence de la bille inférieure à la fréquence de la jarre.

On observe également que l'amplitude de la bille augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation. À la vitesse de rotation de 857 tours par minute, l'amplitude de la bille est d'environ 410 mm (figure 3.10 et figure 3.11) tandis qu'à la vitesse de rotation de 1000 tours par minute, l'amplitude de la bille est de 490 mm. L'augmentation de la vitesse de rotation augmente la vitesse de la bille et de la jarre, ce qui augmente le déplacement de la bille car elle s'éloigne de la jarre. En conséquence, la hauteur maximale de la bille h_{pic} , est également augmentée, ce qui augmente l'énergie potentielle de la bille. La fréquence du déplacement est diminuée. À h_{pic} élevée, l'énergie potentielle de la bille est plus élevée et augmente l'énergie cinétique de la bille pendant le mouvement vers le bas. Par conséquent, pendant la collision entre la bille et la jarre, une vitesse d'impact élevé génère une énergie d'impact plus élevé. En plus de la vitesse de rotation, l'amplitude du mouvement de la jarre influe également sur le h_{pic} de la bille. Un h_{pic} supérieur peut être obtenu si l'amplitude de la jarre est augmentée. Ceci pourrait être réalisé en utilisant un système d'agitation avec de plus grosse cylindrée.

Tableau 3.3: Condition à la phase de collision.

Vitesse angulaire (tr/min)	857	1000
Fréquence de la jarre (Hz)	14.3	16.7
h_{pic} (mm)	410	490
Vitesse de la bille (m / s)	+2.56	2.99
Vitesse de la jarre (m / s)	-2,4961	- 2,91
Energie d'impact (J)	3,0498	4,15

Le tableau (3.2) ci-dessus montre l'amplitude maximale de la bille h_{pic} , la fréquence et la vitesse de la jarre et la vitesse de la bille, qui sont déterminées à partir de la simulation.

À partir des données, l'énergie d'impact est calculée en utilisant l'équation (3.19). Le résultat obtenu montre qu'une énergie d'impact élevée peut être produite à un h_{pic} plus élevé. L'énergie d'impact générée à un $h_{pic}=410\text{mm}$ (fréquence de la jarre = 14,3 Hz) est de 3,0498J alors que l'énergie d'impact générée à un $h_{pic}=490\text{mm}$ (fréquence de la jarre = 16,7 Hz) est de 4,15 (J). La quantité d'énergie d'impact générée à partir de ce modèle est beaucoup plus élevée par rapport à l'énergie d'impact générée dans un broyeur vibratoire.

Les résultats ont montré que l'énergie d'impact générée à la fréquence jarre à 14,3 et 16,7 Hz sont de 0,02 et de 0,048 (J) respectivement.

3.9 Conclusion :

Le système de broyage utiliser dans notre étude est un procédé d'agitation, choisi de manière à contrôler les mouvements de la jarre et de la bille. En effet, avec une configuration verticale, il permet d'éviter à la poudre et à la bille des mouvements aléatoire, réduisant ainsi les frictions entre la poudre et la bille. L'utilisation d'une seule bille permettrait également de réduire les frictions entre les billes qui pourrait interrompre le déplacement de la bille ce qui causerai une diminution de la vitesse de la bille et donc une réduction de l'énergie d'impact générée lors des collisions.

A partir de la simulation, l'amplitude maximale de la bille, h_{pic} , est améliorée et affecte grandement la production d'énergie d'impact lors de la collision. L'augmentation de la vitesse angulaire aussi fait augmenter le h_{pic} , par conséquent, l'augmentation de l'énergie d'impact.

En conclusion, le modèle proposé du système de broyage est en mesure de générer des chocs avec la poudre avec une plus forte probabilité à être emprisonnée entre la bille et la paroi de la jarre quand ils entrent en collision. En conséquence, une réduction de temps de traitement. Comme l'utilisation d'une seule bille réduira au minimum la contamination des poudres.

4.1 Introduction :

Dans le cours de thermodynamique, la complexité résultant du couplage entre phénomènes mécaniques et thermiques nous a amenés à faire des hypothèses simplificatrices sur les transferts de chaleur. En général, nous avons supposé qu'une paroi était soit diatherme (parfaitement conductrice), soit adiabatique (parfaitement isolante). Dans ce chapitre, nous allons essayer d'aller plus loin dans l'étude des transferts de chaleur, qui est l'objet de la thermique. Après un aperçu des différents modes de propagation de la chaleur (que l'on classe habituellement en conduction, convection et rayonnement) [36].

4.2 Mode de Propagation de chaleur :

4.2.1 Conduction :

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effet macroscopique observable est une égalisation des températures du système. Cependant si certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (réservoir de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), il s'établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide [36].

4.2.2 Convection :

A. Définition

Ce mode de transfert est spécifique aux fluides. En plus du transfert de chaleur par conduction toujours présente dans la matière, il y a dans les fluides un transfert de chaleur provoqué par l'écoulement du fluide, c'est à dire par le mouvement d'ensemble des particules qui le composent [36].

Ce phénomène est appelé advection : une masse de fluide qui se déplace transporte avec elle son énergie interne. On peut donc définir la convection comme la réunion de deux modes de transfert de chaleur : la conduction, qui s'effectue à l'échelle microscopique, et l'advection, qui est de nature macroscopique.

B. Classification

On classe généralement la convection en trois catégories [36] :

- La convection naturelle;
- La convection forcée;
- La convection mixte;

La convection naturelle :

Il y a convection naturelle lorsque le mouvement du fluide est uniquement dû à la poussée d'Archimède induite par les variations de masse volumique au sein du fluide, lesquelles sont la conséquence des variations spatiales de température. L'air chaud, plus léger, tend alors à monter, alors que l'air froid descend. Ce mécanisme se produit dans des situations très diverses : il est responsable de l'homogénéisation de la température dans une pièce d'habitation (transfert de chaleur du radiateur vers les parties froides de la pièce), mais également des courants marins ainsi que de la circulation générale de l'atmosphère terrestre.

La convection forcée :

Dans la convection forcée, le fluide doit son mouvement à une cause extérieure (pompe, ventilateur, agitateur, etc.). En convection forcée proprement dite, la poussée d'Archimède est négligeable devant les forces servant à mettre le fluide en mouvement. C'est le cas, par exemple, du refroidissement des moteurs à combustion interne : la pompe à eau pousse le liquide de refroidissement à travers le moteur, puis dans l'échangeur.

La convection mixte :

Il existe comme précédemment, une cause externe au mouvement du fluide, mais insuffisante pour que la poussée d'Archimède puisse être négligée (régime de transition entre la convection libre et la convection forcée). C'est le cas des transferts de chaleur dans un habitacle d'automobile : l'air est soufflé dans l'habitacle par un ventilateur, mais la poussée d'Archimède n'est pas pour autant négligeable, surtout lorsqu'on se place loin des entrées d'air.

4.2.3 Rayonnement :

Tous les corps, quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique.

Le transfert se fait par rayonnement électromagnétique. Il peut être réalisé dans le vide sans la présence de matière.

4.3 Aspect thermique du processus de mécanosynthèse

La collision entre la bille et la poudre compacte peut être modélisée en adoptant deux hypothèses, à savoir que :

- Le temps d'impact Δt est évalué par la théorie hertzienne des impacts élastiques [40] ;
- Le flux d'énergie à la surface de la poudre compacte est uniforme sur toute la surface de contact, il est considéré constant pour toute période inférieure à Δt .

Ce sont des hypothèses représentatives du moment où l'impact a lieu. Cet impact est seulement perturbé par la présence d'une petite quantité de poudre qui représente une toute petite surface de contact.

La figure 4.1 représente schématiquement la prise de la poudre compacte entre la bille et la paroi pendant la collision [38,39].

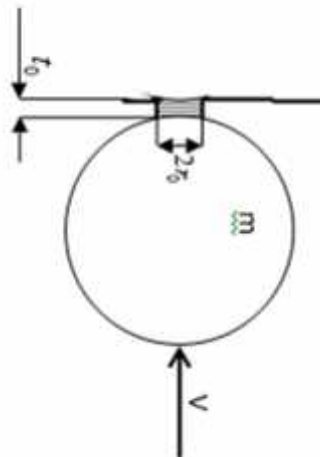


Figure 4.1 : Représentation schématique de la prise de la poudre compacte entre la bille et la paroi pendant la collision.

La même poudre compacte est représentée dans la figure 4.2, par un disque d'épaisseur t_0 et de rayon r_0 [41]. 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 [39] :

$$t_0 = \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (4.1)$$

Avec :

k : Constante.

$D = 2r_0$: Diamètre de la poudre compacte (m).

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

L'énergie cinétique des billes est dissipée en déformation élastique, celle de la poudre compacte en déformation plastique [40].

L'énergie cinétique totale de chaque bille est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.2)$$

Avec :

m : Masse de la bille, Kg;

v : Vitesse relative de la bille au moment de l'impact, m/s.

La figure 4.2 représente schématiquement une poudre compacte d'un diamètre D , et une épaisseur t_0 .

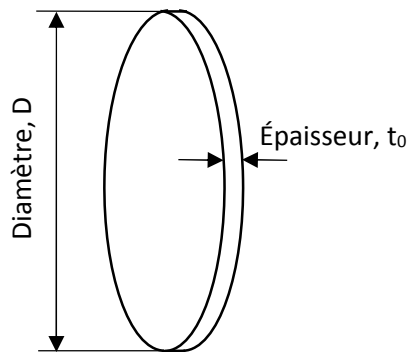


Figure 4.2: Représentation schématique de la poudre compacte [41].

L'analyse effectuée par D.R.Maurice et T.H.Courtney [42], montre que seule une petite fraction ξ de l'énergie disponible est utilisée dans le processus de la déformation plastique. Ainsi, ils montrent que l'énergie plastique U_p dissipée est totalement convertie en chaleur pendant la collision, telle que :

$$U_p = \epsilon E_c \quad (4.3)$$

Avec :

ϵ : Coefficient de déformation plastique de la bille ;

E_c : Énergie cinétique de la bille (J).

Une quantité équivalente de chaleur Q se manifeste à chaque zone de contact.

4.4 Modélisation thermique en mécanosynthèse

Après avoir présenté les modèles mathématiques du processus thermique pour le cas général, nous développerons ces mêmes outils pour le cas de la mécanosynthèse.

4.4.1 Première approche (cas semi-infini)

Dans le cas de la mécanosynthèse, comme le montre la figure 4.3, on modélise le processus de transfert de chaleur dans la surface de contact de la bille par un milieu semi-infini avec un flux de chaleur q_1 sur une petite surface circulaire de rayon r_0 .

On peut considérer cette approximation comme raisonnable du fait que la surface de contact pendant l'impact est très petite comparée à la surface de la bille [40].

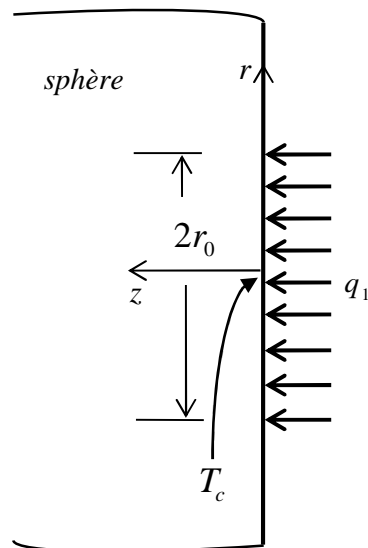


Figure 4.3: Assimilation de la bille à un corps semi-infini [40].

Initialement à $t=0$, le flux de chaleur fourni est considéré comme étant constant. Il est exprimé par q_1 suivant la relation ci-dessous :

$$q_1 = \frac{(1-u)Q}{fr_0^2\Delta t} \quad (4.4)$$

Où :

u : représente la fraction de la chaleur produite dans la poudre ;

$(1-u)$: Représente la fraction produite dans la bille ;

Q : représente une quantité moyenne engendrée par le processus de déformation totale après une période Δt .

Concernant la température de contact, elle est donnée par la relation suivante :

$$T_c = T_0 + \frac{2q_1\sqrt{r_s\Delta t}}{K_s} \left\{ \frac{1}{\sqrt{f}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{r_s\Delta t}} \right\} \quad (4.5)$$

Avec :

r_s : La diffusivité thermique de la bille en m^2/s ;

K_s : La conductivité thermique de la bille en $J/s.m. ^\circ K$;

T_0 : La température ambiante en $^\circ K$.

La durée de l'impact Δt et le rayon de contact r_0 se calculent suivant l'analyse hertzienne par les relations (6 et 7) [6].

$$\Delta t = 2.787V^{-0.2} \left(\frac{m \cdot s}{E} \right)^{0.4} R_b \quad (4.6)$$

$$r_0 = 0.9731V^{0.4} \left(\frac{m \cdot s}{E} \right)^{0.2} R_b \quad (4.7)$$

Où :

E : Module d'Young, N/m^2 ;

R_b : Rayon de la bille, m .

4.4.2 Deuxième approche (cas plaque plane)

Pour cette deuxième approche, la géométrie de l'écoulement de chaleur dans la poudre compacte peut être modélisée par une plaque plane à une dimension (figure 4.4) sur une surface $x=t_0/2$, avec un flux de chaleur q_2 donné par :

$$q_2 = \frac{uQ}{fr_0^2\Delta t} \quad (4.8)$$

Où :

U : Fraction de la chaleur produite dans la poudre;

Q : Quantité moyenne engendrée par le processus de déformation totale, J; cette quantité représente l'équation (3) ;

r_0 : Rayon de la poudre compacte, m;

Δt : Temps d'impact, s.

Pour des raisons de symétrie [40], aucun écoulement de chaleur ne traverse le plan moyen, de même on négligera les pertes de température à travers les extrémités libres de la poudre compacte, ceux qui, en réalité est vrais à cause de la grandeur du rapport $2r_0/t_0$.

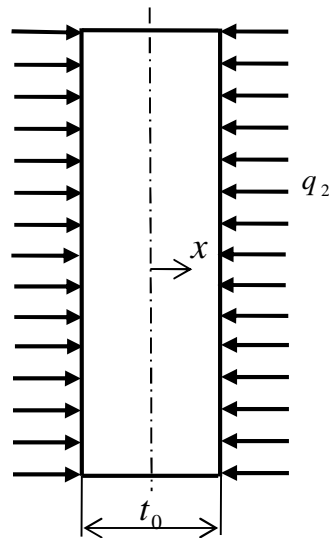


Figure 4.4 : Assimilation de la poudre compacte à une plaque Plane à une dimension [40].

La distribution de la température à la fin de l'impact est donnée par l'équation ci-dessous :

$$T(x) = T_0 + \frac{2q_2\Delta t}{\dots_c C_p t_0} + \frac{q_2 t_0}{2K_c} \left\{ \frac{12x^2 - t_0^2}{6t_0^2} - \frac{2}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{4n^2 f^2 r_c \Delta t}{t_0^2}\right) \cos\left(\frac{2nfx}{t_0}\right) \right\} \quad (4.9)$$

Où :

c: indice se référant aux quantités connexes à la poudre compacte.

Ainsi, la température de contact en $x = t_0/2$ est donnée par la relation suivante:

$$T_c = T_0 + \frac{2q_2\Delta\ddagger}{\dots_c C_p t_0} + \frac{q_2 t_0}{2K_c} \left\{ \frac{1}{3} - \frac{2}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{4n^2 f^2 r_c \Delta\ddagger}{t_0^2}\right) \cos(nf) \right\} \quad (4.10)$$

La continuité de la température implique une équivalence entre la température de contact donnée par la relation (5) et celle donnée par la relation (10) ce qui nous conduit à la relation (11) [40] :

$$\frac{2q_1\sqrt{r_s\Delta\ddagger}}{K_s} \left\{ \frac{1}{\sqrt{f}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{r_s\Delta\ddagger}} \right\} = \frac{2q_2\Delta\ddagger}{\dots_c C_p t_0} + \frac{q_2 t_0}{2K_c} \left\{ \frac{1}{3} - \frac{2}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{4n^2 f^2 r_c \Delta\ddagger}{t_0^2}\right) \cos(nf) \right\} \quad (4.11)$$

La fraction u de la chaleur partagée entre la poudre compacte et la bille peut être obtenue par la relation (11). Concernant le profil de température, il pourra être déterminé par l'équation (4.9).

4.4.3 Troisième approche (cas source plane instantanée)

Jusqu'ici, l'analyse de la température engendrée par l'impact dans la poudre compacte considérait le processus de collision comme un événement et que la partie de l'énergie d'impact à l'origine de la déformation plastique est un flux de chaleur constant durant un temps d'impact fini équivalent à $\Delta\ddagger$.

Considérons maintenant l'approche où le flux de chaleur causé par la dissipation de l'énergie plastique agit à l'instant $t=0$, à la surface de contact. Dans ce cas, on négligera les effets de la présence de la poudre compacte, de ce fait on modélisera le système par une source plane instantanée de rayon r_0 dans le plan $z=0$ à l'instant $t=0$ figure 4.5.

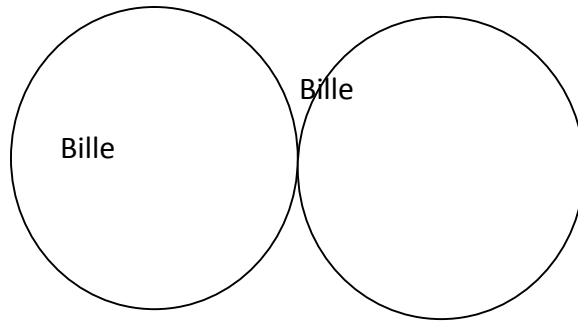


Figure 4.5: Assimilation du système à une source plane instantanée [40].

Dans ce cas la température de contact T_c à la fin de l'impact sera donnée par la relation (4.12) citée en dessous:

$$T_c = \frac{Q}{2fr_0^2 \dots_s C_{ps} \sqrt{fr_s \Delta t}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4r_s \Delta t}\right) \right\} \quad (4.12)$$

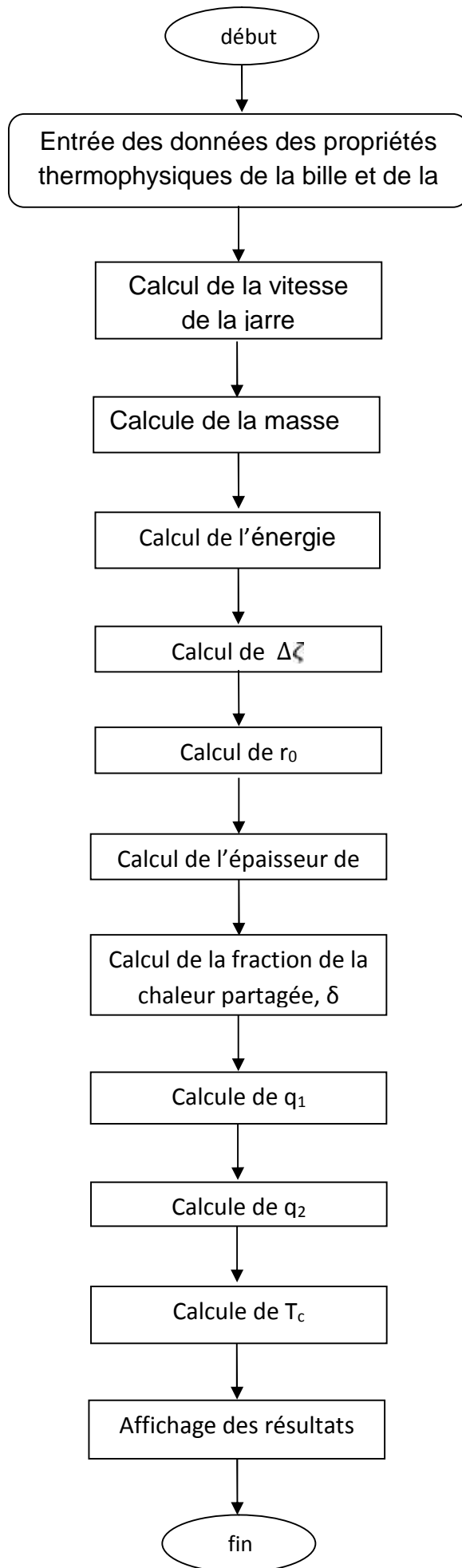
Où,

\dots_s : Densité volumique de la bille, Kg/m³ ;

C_{ps} : Chaleur spécifique de la bille, J/Kg.

4.5 L'organigramme de notre étude :

Ce schéma représente les étapes suivies afin d'établir notre Algorithme



4.6 Étude de la variation de la température

4.6.1 Conditions de broyage:

Notre travail consiste à calculer la température de contacts entre billes-poudre en faisant varier les paramètres suivants : les paramètres géométriques, dynamiques et thermophysiques.

On prend les paramètres ci-dessus comme conditions de départ, et on note dans ce qui suit chaque variation d'un de ces paramètres.

Les principales caractéristiques du broyeur bielle-manivelle sont :

- Diamètre de la jarre, $D_j=41\text{mm}$;
- Rayon du vilebrequin $r=0,027\text{ m}$;
- Longueur de la bielle $c=0,077\text{m}$;
- Nombre de billes utilisées dans la jarre, $N_b=1$;
- Vitesse angulaire, $w=857\text{tr/mn}$;
- Bille en acier inoxydable;
- Diamètre de la bille, $D_b=40\text{mm}$;
- Épaisseur de contact, $t_0=10^{-4}\text{ m}$;
- Rayon de la poudre, $r_0=10^{-3}\text{m}$;
- Coefficient de déformation, $\Psi = 0.03$;

◆ Les propriétés thermophysiques des poudres d'aluminium et de titane ainsi que celles de la bille sont les suivantes :

Tableau 4.1: Propriétés thermophysiques des poudres et de la bille.

Matériaux	Conductivité thermique (K_s)	Chaleur spécifique	Masse volumique (ρ)	Module d'Young(E)
Aluminium	238	917	2700	/
Titane	16	528	4500	/
Acier inoxydable (bille)	16.2	50	8000	2.10^{11}

4.6.2 Influence de la vitesse de choc sur l'énergie d'impact:

D'après l'étude faite dans le chapitre 3, l'énergie de choc dépend de la vitesse relative (La différence de vitesse entre la jarre et la bille) $E_i = \frac{1}{2} m (V_d - V_j)^2$, le processus du broyage mécanique utilise l'énergie produite par l'impact sur les collisions des billes contre les poudres. Plus l'énergie de choc est importante, plus le broyage est efficace.

Dans le but de choisir et d'améliorer les performances de notre broyeur, on compare d'un point de vue théorique l'énergie de choc produite dans la même plage de vitesse avec celle d'un broyeur planétaire, et on simule pour les mêmes paramètres (poids, diamètre, ...etc.).

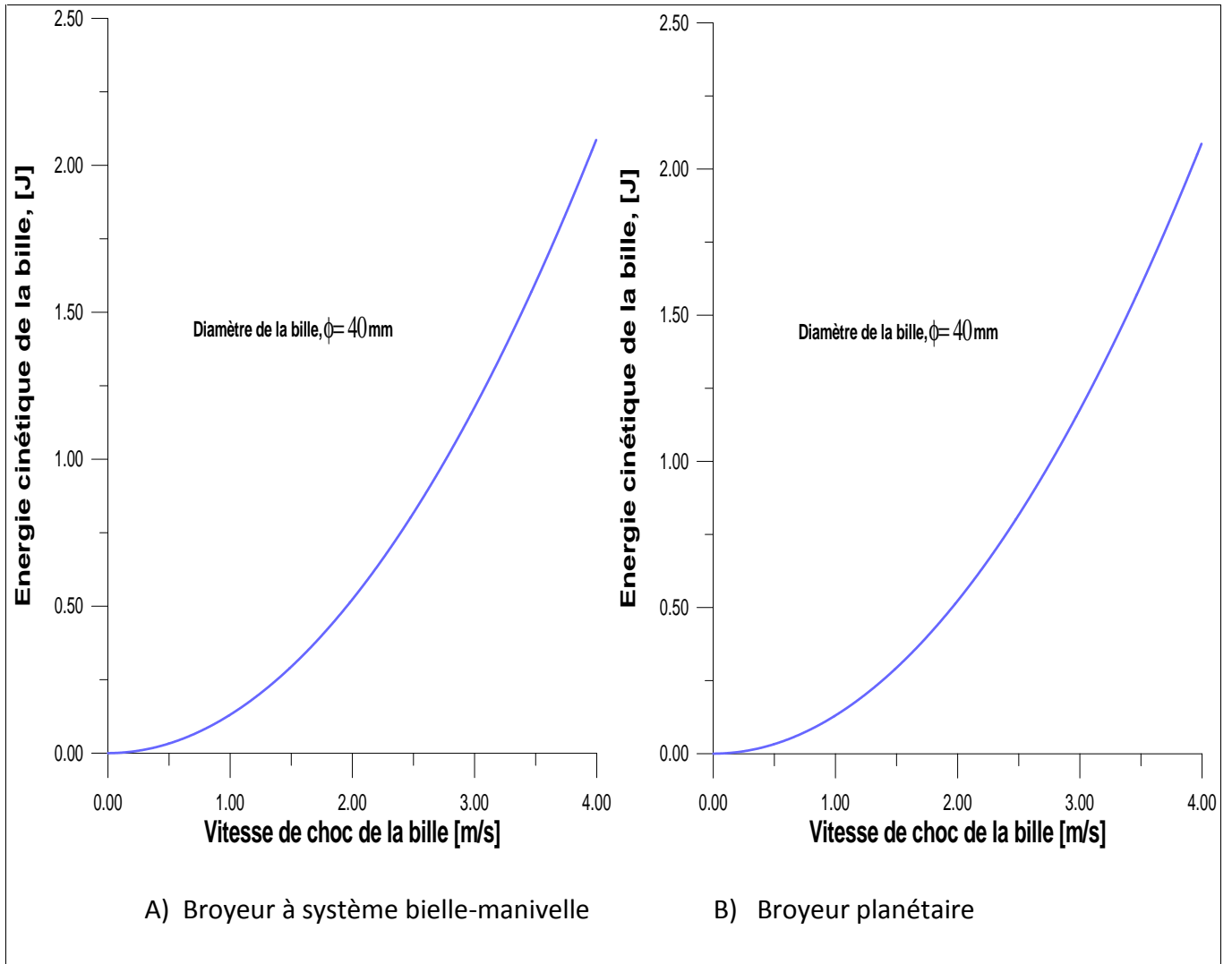
Comme le montre la figure (4.6), les valeurs de E augmentent de façon monotone avec la vitesse de choc. C'est une augmentation parabolique. C'est-à-dire, l'énergie de choc manifeste une augmentation monotone avec la vitesse de choc V_d ,

L'augmentation de la vitesse de choc améliore l'apport d'énergie de broyage, ceci pour les deux cas de système de broyage.

D'après les graphes les broyeurs sont similaires, sauf qu'à l'expérimental le broyeur planétaire manque de précision, ce qui influe sur le temps de broyage. Les études menées par MR ZIDANE, ont montré que nous ne pouvons pas contrôler le mouvement des billes, ce qui veut dire qu'il y'a une chance sur 5 pour que l'énergie cinétique produite par le mouvement de la bille s'annule lors d'un impacte bille-bille ou bille-paroi de la jarre, en d'autres termes l'impact avec la paroi ou avec une autre bille se produit, mais sans qu'il y ait de la poudre entre eux. La figure (4,7) montre les valeurs de l'énergie d'impact par choc pour un broyeur planétaire, l'énergie est divisée par cinq.

Le tableau 4.2 représente les valeurs de l'énergie d'impact par choc pour un broyeur planétaire, l'énergie est divisée par cinq [14].

Dans le cas de notre broyeur, la poudre est emprisonnée entre la bille et la paroi de la jarre, en effet, à chaque impact, la bille écrase la poudre contre la jarre.



De ce fait on pourra dire que notre broyeur est plus économique.

Figure 4.6 Énergie d'impact en fonction de la vitesse de choc

Tableau 4.2 l'énergie de choc (bille-poudre) dans un broyeur planétaire

Énergie (joule par choc)	Énergie (joule)
0.1714	0.8568
0.2338	1.1688
0.0262	0.1308
0.1046	0.5230
0.2353	1.1766

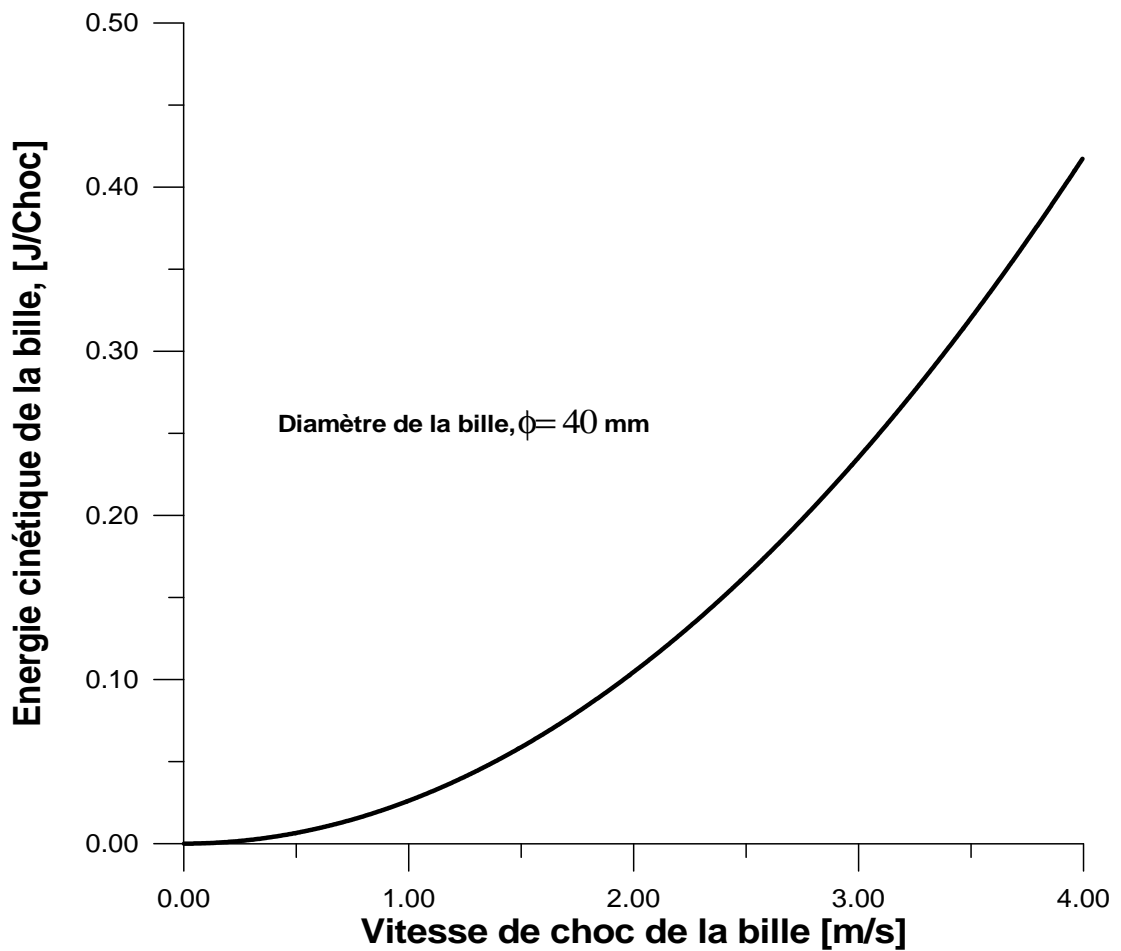


Figure 4.7 Énergie d'impact par choc en fonction de la vitesse de choc

La vitesse de choc du broyeur bielle manivelle peut aller jusqu'à $(2,56+2,56= 5,12)$ m/s ce qui produit une énergie de choc égal à 3,447 joules.

Dans l'expérimental le broyeur planétaire ne pourra pas manifester une telle vitesse de choc pour un tel diamètre de bille.

Le broyeur bille-manivelle offre des conditions idéales (masse, poids) pour produire une énergie d'impact importante.

De ce fait, on conclut que notre broyeur du point de vue énergétique est plus avantageux.

4.6.3 Influence de la vitesse de choc sur la température de contact Bille-Poudre

On a démontré précédemment que le choc entre la bille et la poudre crée une énergie, et qu'une partie de cette énergie est convertie en une quantité de chaleur Q lors de l'impact.

Cette énergie (E_i) qui est égale à $\frac{1}{2} m (V_d - V_j)^2$ dépend de la variation de la vitesse relative.

La vitesse relative est la différence entre la vitesse de la jarre et la vitesse de la bille au moment de l'impact. Dans le cas notre broyeur, V_r varie de 0 jusqu'à 5,12 m/s.

A fin de comparer les résultats avec ceux obtenus avec un broyeur planétaire le PM 400 [14]. On fait varier la vitesse de [0-4] m/s

La figure 6. 2 représente la variation de la température de contact bille-poudre en fonction de la vitesse de choc de la bille pour deux matériaux à savoir : l'aluminium et le titane. Les températures présentent un déplacement vers des hautes valeurs allant d'un minimum de 81.04 °C (cas Aluminium) à un maximum 293.70 °C (cas Titane).

Tableau 4.3 : Variation de la température de contact en fonction de la température pour les deux broyeurs

Température de contact avec la poudre d'Aluminium (°C)		Vitesse de choc [m/s]
Broyeur bielle manivelle	Broyeur planétaire	
34.06	27.3740	1
55.48	70.5111	2
81.04	122.6481	3

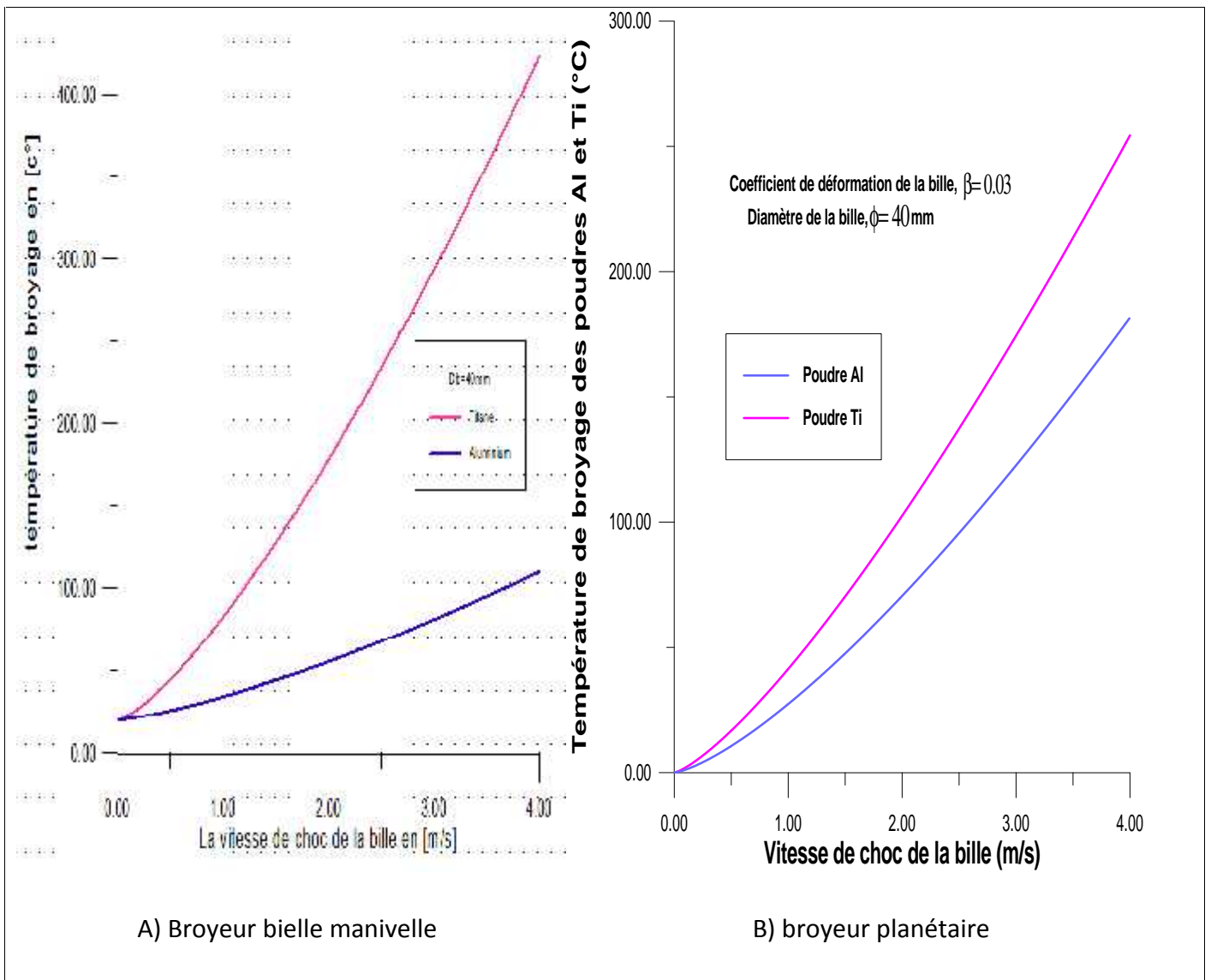


Figure 4.8. La variation de la température pour l'aluminium et titane en fonction de la variation de la vitesse de choc

4.6.4 Influence de la vitesse angulaire du vilebrequin sur la température de contact:

On fait varier la vitesse angulaire du vilebrequin de [700-1100] tr/mn pour déterminer les températures de contact de l'Aluminium et du Titane à l'intérieur de la jarre sur cette plage, afin de déterminer les limites de ce broyeur.

L'augmentation de la vitesse angulaire du vilebrequin influe directement sur la température de contact lors du broyage, en effet, l'augmentation de la vitesse de rotation augmente la vitesse de la bille et de la jarre, ce qui augmente le déplacement de

la bille, car elle s'écarte de la jarre, et fera augmenter ainsi la vitesse de choc de la bille. En conséquence, la température de contact bille poudre augmente figure (4.7).

L'étude menée sur la variation de la vitesse angulaire sur le broyeur à système bielle-manivelle a démontré que la température de contact de l'aluminium est de 80.99°C lorsque la vitesse angulaire est de 1000tr\mn.

Alors qu'avec cette même valeur de vitesse angulaire dans un broyeur planétaire PM 400, la température de contact atteinte est d'environ 122.09 °C.

Sachant qu'en mécanosynthèse, la température de broyage des poudres ne doit en aucun atteindre les températures de fusion. Si non, ce n'est plus des poudres, mais des alliages usuels déjà connus.

Tableau 4.4 : la variation de la température pour l'aluminium en fonction de la variation de la vitesse angulaire pour le broyeur bielle manivelle et le broyeur planétaire.

Température de contact (c)° Aluminium		Vitesse angulaire [tr/min]
BIELLE MANIVELLE	PM400	Tr/mn
69	98.76	857
72.97	105	900
80.99	122.09	1000
89.30	140	1100

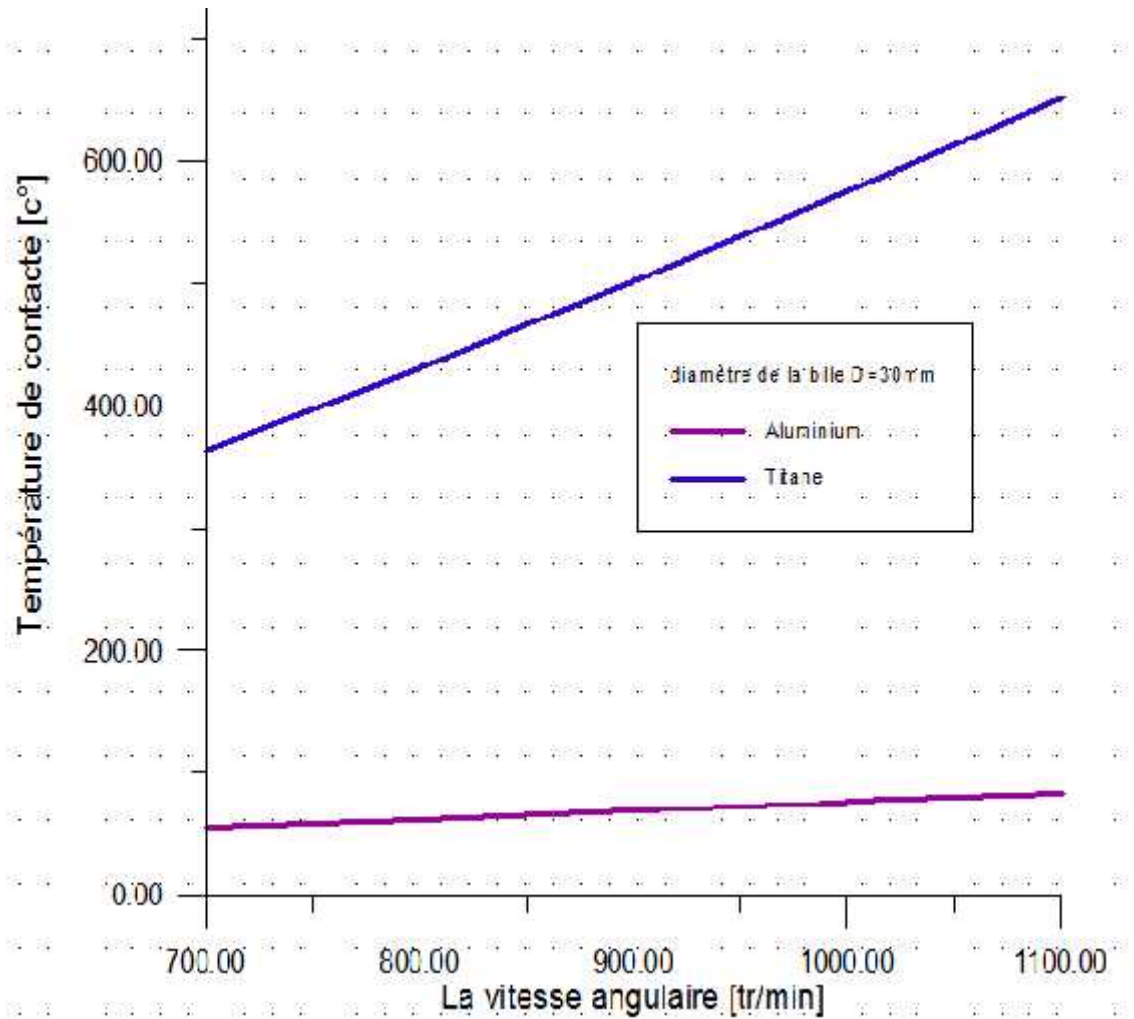


Figure 4.9 : La variation de température pour l'aluminium et Titane en fonction de la variation de la vitesse angulaire.

4.6.5 Influence l'énergie d'impact de la bille sur la température de contact bille poudre

La collision bille-poudre est une collision inélastique, cela veut dire que c'est une collision au cours de laquelle l'énergie cinétique de la bille qui entre en collision avec la poudre est totalement ou en partie convertie en énergie plastique dissipée U_p [45], cette dernière est totalement convertie en chaleur Q. Q se manifeste à chaque zone de contact.

Les graphes A et B ci-dessous sont ceux du broyeur bielle manivelle et du broyeur planétaire, respectivement, ils montrent la variation de la température en fonction de l'énergie de choc.

On voit que la température de contact augmente de manière monotone avec l'énergie d'impact produite dans les deux graphes, mais pas avec le même taux

On note pour une énergie nulle la température initiale T_0 pour le broyeur planétaire est de 20°C alors que pour le broyeur planétaire elle est de 0°C, les paramètres thermophysiques ont été pris à cette température.

On remarque que pour une même valeur d'énergie on a une température différente dans les deux broyeurs.

La température de contact produite dans le broyeur à système bielle-manivelle est moins élevée que celle dans le broyeur planétaire, ce qui représente un avantage conséquent dans l'opération de broyage.

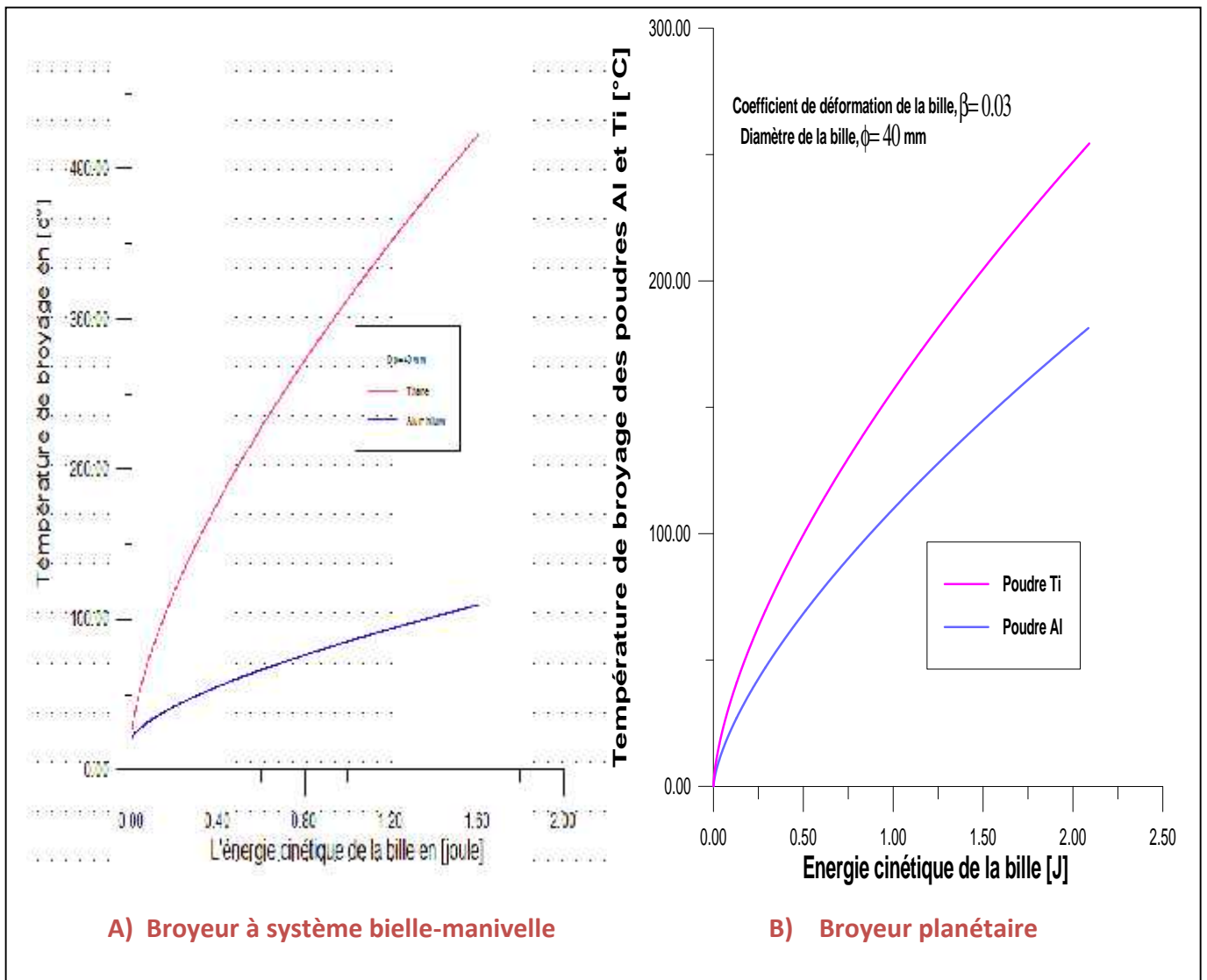


Figure 4.10 : variation de la température de contact en fonction de l'énergie d'impact de la bille.

4.6.6 Température de contact et énergie dissipée Bille poudre en variant les matériaux « poudres » :

Avec $\beta = 0.03$, $t_0 = 10^{-4} \text{ m}$, $R_0 = 10^{-3} \text{ m}$, $r = 0.027 \text{ m}$, $r_b = 0.02 \text{ m}$, $c = 0.077 \text{ m}$

Le tableau représente la variation de la température de contact bille-poudre en faisant varier les poudres à savoir : Niobium, Aluminium et Titane.

Le broyage des poudres élémentaires ou alliées se traduit par un transfert d'énergie des outils de broyage (bille et parois de la jarre) vers les poudres. Ces poudres favorisent l'élévation de l'énergie libre des particules et l'élévation de la température due

à une transformation adiabatique du travail de déformation. Avec $w= 1000\text{tr}/\text{min}$, $\epsilon =0.03$

Tableau 4.5 la variation de température et l'énergie pour chaque matériau pour $\epsilon =0.03$

	Titane	Aluminium	Niobium
Tc	293.48	80.99	178.49
Énergie dissipée	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$
Fraction δ	0.50	0.88	0.71
Vitesse	-2.99	-2.99	-2.99

Discussion du tableau :

D'après les conditions de broyage et les paramètres thermophysique des poudres, on remarque dans le tableau que la température de choc dans le cas de l'aluminium est moins élevée que celle du titane ainsi que celle du niobium. Ceci s'explique par propriétés propres de chaque poudre étudiée. En effet, le titane est plus dur que l'aluminium et le niobium donc nécessitent plus de résistance au broyage, il a donc une charge à la rupture plus élevée, ce qui produira une température d'impact plus importante. (La dureté est la capacité d'un corps à résister à la pénétration d'un corps plus dur que lui).

L'énergie reste constante pour les différents matériaux vu que cette dernière ne dépend pas de la variation du matériau de la poudre, mais de celui de la bille.

4.6.7 Température de contact Bille poudre en variant les paramètres géométriques du broyeur :

Pour les deux matériaux aluminium et titane, on fait les essais en faisant varier les paramètres géométriques du système bielle-manivelle à savoir la longueur de la bielle et le rayon du vilebrequin, à une vitesse angulaire $\omega=1000 \text{ tr}/\text{min}$

A – Influence de la longueur de la bielle sur la vitesse de choc

On garde les valeurs de $r=0.027$ (rayon de vilebrequin), $r_b=0.02$ (rayon de la bille) et on fait varier la longueur de C (longueur de la bielle) à $E = 0.03$

L'augmentation de la longueur de la bielle « C » influe directement sur la vitesse de la bille lors du broyage, en effet, l'augmentation de la longueur de la bielle fait diminuer la vitesse de la jarre, ce qui par conséquent fait diminuer la vitesse de choc de la bille figure (4.9).

On a démontré précédemment que la vitesse de choc de la bille influe sur la température d'impacte entre la bille et la poudre, et vu que la variation de la longueur de bielle fait varier la vitesse de la bille, par conséquent, la température varie à son tour lors de la variation de C.

L'augmentation de la longueur de la bielle a un impact négatif sur le processus de broyage (il diminue la vitesse, ce qui nécessite des temps plus longs lors du broyage).

Tableau 4.6 : Variation de la température en fonction de la variation des vitesses / bille
acier aluminium, titane

Langueur c [m]	Énergie (joule)*10 ⁻²	Vitesse [m/s]	Température [K]	
			Aluminium	Titane
0.09	2.62	-2.94	79.67	287.54
0.08	2.68	-2.98	80.64	291.91
0.077	2.71	-2.99	80.99	293
0.06	2.90	-3.10	83.84	306.30
0.05	3.10	-3.21	86.84	319.84
0.04	3.52	-3.41	92.68	346.15

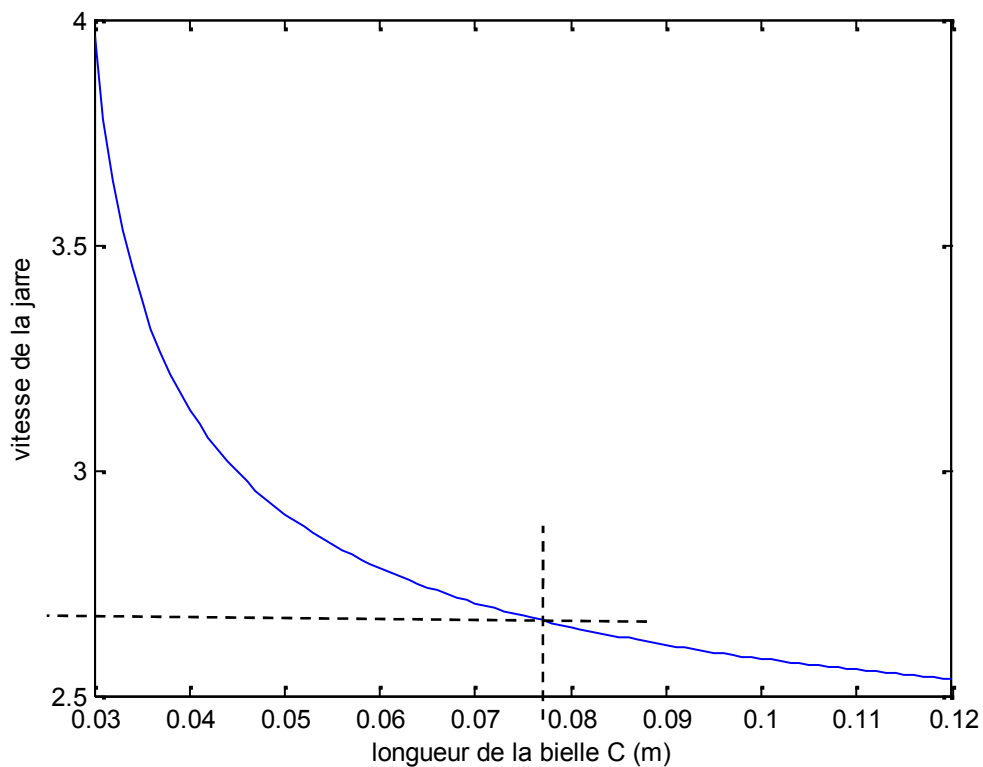


Figure 4.9 La variation de la vitesse en fonction de la longueur de la bielle C

B – Influence du rayon du vilebrequin sur la vitesse de choc

On garde les valeurs de $c=0.077\text{m}$ (longueur de la bielle), $r_b=0.02\text{m}$ (rayon de la bille) et on fait varier le rayon r (rayon du vilebrequin) avec $E = 0.03$

A une même vitesse angulaire, nous aurons des vitesses différentes selon le rayon de la bielle.

Cela signifie qu'en augmentant le rayon de la bielle, le piston subit des accélérations plus fortes, puisqu'il atteint une vitesse maximale plus élevée pour une même course.

La vitesse de choc de la bille influe sur la température de contact, et tout comme pour la variation de la longueur de bielle, la variation du rayon du vilebrequin fait varier la vitesse de la bille, on conclue que la température varie à son tour lors de la variation de r .

L'augmentation du rayon du vilebrequin a un impact positif sur le processus de broyage

Il augmente la vitesse, ce qui se traduit par un temps de broyage plus minime, mais en tenant compte aussi de la température, en effet l'augmentation de la vitesse de choc fait augmenter la température, sachant que chaque matériau a un seuil de température à ne pas dépasser au risque d'atteindre sa limite de fusion

Tableau 4.7 variations des températures et l'énergie en fonction de variation de rayon.

Rayon r [m]	Énergie (joule)	Vitesse [m/s]	Température [°C]	
			Aluminium	Titane
0.04	$6,71. 10^{-2}$	-4.71	131.99	523
0.03	$3,43. 10^{-2}$	-3.37	91.47	340
0.027	$2,71. 10^{-2}$	-2.99	80.99	293.48
0.02	$1,40. 10^{-2}$	-2.15	59.29	195.59
0.01	$3,24. 10^{-2}$	-1.03	34.75	85.43

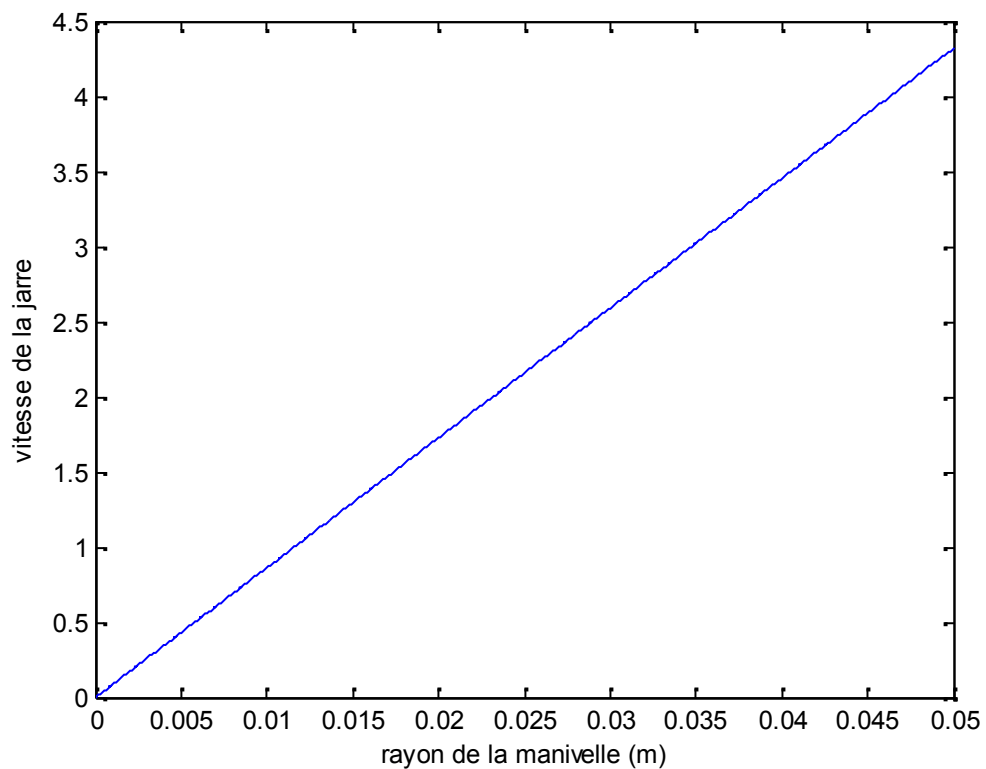


Figure 4.10. La variation de la vitesse en fonction du rayon du vilebrequin r

Le rapport R/L de la manivelle est l'excentration du maneton ou encore demi-course sur la longueur L de la bielle.

Toute la cinématique du système bielle-manivelle repose sur ce rapport R/L . Plus ce rapport est faible (course courte et bielle longue), plus les variations de vitesse du piston sont progressives, la vitesse instantanée du piston se rapprochant d'une fonction sinusoïdale du temps.

Pour le cas qui nous intéresse, augmenter la course du piston tout en conservant la même longueur de bielle revient logiquement à augmenter le rapport R/L , la vitesse de la jarre augmentera également, ainsi que celle de la bille naturellement.

4.7 Conclusion :

Ce chapitre expose les résultats de notre étude sur :

- La variation de la température en mécanosynthèse ;
- La variation de température dans un broyeur a système bielle-manivelle.

Cette étude nous a permis de mettre en œuvre un modèle mathématique précis décrivant les relations des paramètres géométriques et thermophysiques influents sur la température de contact.

L'étude à monter aussi que le broyeur a système bielle-manivelle d'un point de vue énergétique que thermique, donne des résultats plus satisfaisants que ceux du broyeur planétaire.

Conclusion générale :

Du fait de sa capacité à broyer des matériaux à l'échelle nanométrique et à obtenir des alliages avec des densités particulièrement hautes, la mécanosynthèse a fait apparaître des propriétés que les autres méthodes ne pouvaient donner. Ainsi, les améliorations mécaniques ou encore les caractères magnétiques nouveaux des alliages obtenus par la mécanosynthèse ont donné l'élan nécessaire pour intéresser les scientifiques. Cependant, il existe de nombreuses lacunes concernant ce procédé de broyage.

Des meilleurs résultats de broyage pourraient venir en utilisant d'autres techniques qui utilisent l'énergie mécanique pour élaborer les mêmes types de matériaux métastables que la mécanosynthèse.

Notre étude a eu pour but de tester l'une de ces nouvelles techniques, un broyeur efficace pour la synthèse des poudres nanométrique et qui fonctionne par le mécanisme bielle-manivelle, totalement différent de celui du broyeur planétaire.

Le broyeur à système bielle-manivelle utilise un mécanisme simple est efficace. Pour sa fabrication on aura besoin que d'un moteur électrique puissant pouvant générer une vitesse angulaire de plus de 1000 tr/min, une jarre et d'un mécanisme bielle-manivelle.

Cette simplicité se traduit par un cahier de charge moins lourd que celui d'un broyeur planétaire, de par son prix et de par sa complexité. (Le broyeur PM 400 coute environ 4.000.000 de Dinard Algérien).

Le modèle proposé du système de broyage est en mesure de générer des chocs avec la poudre avec une plus forte probabilité à être emprisonnée entre la bille et la paroi inférieure de la jarre quand ils entrent en collision. En conséquence, le taux de rupture du processus pourrait être amélioré, ce qui réduit le temps de traitement. Par conséquent, la contamination des poudres pourrait être réduite au minimum et la hausse de température au cours du processus pourrait être évitée.

En outre, il est possible d'intensifier le modèle à la production en série en multipliant le système d'agitation qui utilise des pièces plus importantes.

Annexe 1

1. Fonction d'erreur (erf, erfc, ...) [43]

1.1. Définition :

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u'^2} du' \quad (1)$$

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{\int_0^u e^{-u'^2} du'}{\int_0^\infty e^{-u'^2} du'} \quad (2)$$

Avec :

$$\operatorname{erf}(\infty) = 1 \quad (3)$$

Et

$$\operatorname{erf}(0) = 0 \quad (4)$$

1.2. Fonction d'erreur complémentaire

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-u'^2} du' \quad (5)$$

2.1.1 Dérivées et intégrales

$$\frac{d}{du} \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} \quad (6)$$

$$\int_u^\infty \operatorname{erfc}(u') du' = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u \operatorname{erfc}(u) \quad (7)$$

$\int_u^\infty \operatorname{erfc}(u') du'$: est parfois noté $\operatorname{ierfc}(u)$.

Annexe 2

La transformation de Laplace [43] :

(Cas d'un système à deux variables x et t)

2. Rappelle sur la transformée de la place :

Définition : une fonction $F(t)$ on fait correspondre une transformée de la place $f(p)$ par :

$$p \in \mathbb{C} : \quad f(p) = \int_0^\infty e^{-pt} F(t) dt$$

Cette transformation est linéaire.

2.1 Quelques propriétés :

F(p)	F(t)
$F(p + k)$	$e^{-k} F(t)$
$F(p)e^{-k} kp$	$F(t - k)$
$Pf(p) - f(0+)$	$F'(t)$
$df/dx(x, p)$	$d /d (x, t)$
$\int_{x1}^{x2} f(x, p)d$	$\int_{x1}^{x2} F(x, t)d$
$f(p)g(p)$	$F(t) * G(t)$ (* : produit de convolution)

1.3 Table des transformée de la place de certaines fonctions

$$\theta(p) = \int_0^{\infty} F(t)e^{-pt} dt \quad \text{avec } q^2 = \frac{k}{a}; \quad \alpha = \frac{k}{\dots_s} (d \quad \acute{e}).$$

$\Theta(p)$	F(t)
1/p	1
1/ (p ^v +1), v > -1	$\Gamma^v / \Gamma (v+1)$
1/ (P + B)	e^{-B}

$\omega / (p^2 + \omega^2)$	$\text{Sin } \omega t$
$P / (p^2 + \omega^2)$	$\text{Cos } \omega t$
$\exp(-qx)$	$(x/2)(\pi\alpha t^3)^{-1/2} \exp(-x^2/4\alpha t)$
$\exp(-qx)/q$	$(\alpha/\pi t)^{1/2} \exp(-x^2/4\alpha t)$
$\exp(-qx)/p$	$\text{erfc}[x/(2\sqrt{\alpha t})]$
$\exp(-qx)/pq$	$2(\alpha t/\pi)^{1/2} \exp(-x^2/4\alpha t) - x \text{erfc}[x/(2\sqrt{\alpha t})]$
$\exp(-qx)/p^2$	$(t + x^2/2\alpha) \text{erfc}[x/(2\sqrt{\alpha t})] - x(t/\pi\alpha)^{1/2} \exp(-x^2/4\alpha t)$

2.2 Application de la méthode

La méthode consiste :

- A faire subir une transformation de Laplace au système complet d'équation comprenant l'équation de l'énergie (qui devient alors une équation différentielle en x), les conditions aux limites et la condition initiale.
- Résoudre le nouveau système ainsi obtenu dans l'espace transformé.
- Revenir, par une transformation inverse de la solution, à l'espace (x,t) . Deux méthodes sont possibles :
 - Dans un cas favorable utiliser un dictionnaire d'image (voir ci-dessus).
 - Sinon utiliser la formule d'inversion de Mellin.

Annexe 3

Utilisation de la fonction de Green en conduction instationnaire [43] :

1. Définition de la fonction de Green

Un problème générale à résoudre en conduction instationnaire linéaire (k et h constants, rayonnement exclu ou linéarisé) à une structure du type :

$$\frac{\partial}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{p(x,t)}{\rho} \quad (1)$$

Equation d'énergie dans laquelle $T(r,t)$ représente le champ de température au point r , à l'instant t .

$$T(r,t=0)=T_0(r) \quad (2)$$

Conduction initiale et conduction aux limites du type :

$$T(r,t)=T_1(r,t) \quad \text{sur } S1 \quad (3)$$

$$-k\nabla T \cdot n_{\text{ext}} = h[T(r,t) - T_2(r,t)] + \varphi_0(r,t) \quad \text{sur } S2 \quad (4)$$

Ou $S1$ et $S2$ représentent deux parties de la surface latérale S ($S=S1 \cup S2$) et n_{ext} désigne le vecteur unitaire de la normale dirigée vers l'extérieur de S .

On appelle fonction de green associée à un tel problème la fonction $G(r,r',t-t')$ solution du système homogène associé à (1) :

$$\frac{\partial}{\partial t} = \alpha \nabla^2 G + \delta(r - r') \delta(t - t') \quad (2.1)$$

$$G(r,r',t-t')=0 \quad \text{si } t < t' \quad (2.2)$$

$$G(r,r',t-t')=0 \quad \text{sur } S1 \quad (2.3)$$

$$-k\nabla G \cdot n_e = hG \quad \text{sur } S2 \quad (2.4)$$

La fonction de green représente donc la réponse en température du système (2) constitué par les parties homogènes du système (1) dans le cas ou une impulsion de norme unité est appliquée au point r' à l'instant t' . Cette réponse est appelée réponse percussionnelle du système. L'interprétation physique qui vient d'être faite de la solution G du système(2) va être utile par la suite dans la phase de détermination pratique de quelques fonctions de Green pour des systèmes particuliers.

Il a été démontré que la solution du système (1) se déduit de la solution G du système (2) et des expressions des termes non homogènes de (1). Soient $T_0(r), T_1(r,t), T_2(r,t), \varphi_0(r,t)$ par la relation explicite :

$$\begin{aligned} T(r,t) = & \int_V G(r,r',t) T_0(r') dV' + \alpha \int_0^t \int_{S_1} T_1(r',t') (-n_e) \nabla_{r'} G(r,r',t-t') dS_1' dt' \\ & + \alpha \int_0^t \int_{S_2} \left[\left(\frac{h}{k} T_2(r',t') - \frac{\varphi_0}{k}(r',t') \right) G(r,r',t-t') dS_2' dt' \right. \\ & \left. + \alpha \int_0^t \int_V G(r,r',t-t') \frac{P}{\rho c_p}(r',t') dV' dt' \right] \end{aligned}$$

La notation $\nabla_{r'}$ signifie que le gradient est pris par rapport aux composantes du vecteur r'

Remarque :

Si on compare le premier et quatrième terme du membre de droite, il apparaît qu'une condition initiale s'interprète comme une puissance P dissipée à l'instant $t' = 0$ uniquement.

En pratique le problème s'est simplifié puisque la difficulté essentielle réside dans la résolution du système homogène (2) qui peut être entreprise par des techniques usuelle (Laplace, etc.)

2. Fonction de Green associée à un milieu fini

On prend à titre d'exemple un mur fini d'épaisseur e , initialement à T_0 , isolé en $x=e$, et auquel est appliqué un flux φ_0 en $x = 0$ (f 1).

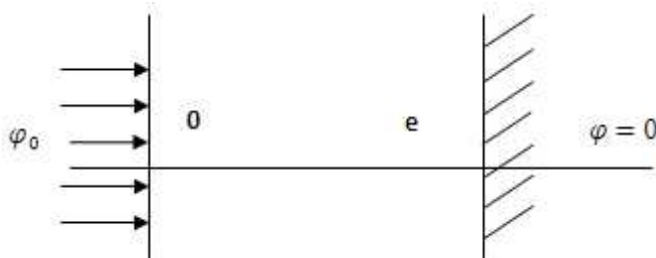


Figure 1 [10]

La fonction de green $G(x, x', t - t')$ correspond à la réponse à une impulsion unité en x' à l'instant t' , les deux faces du mur étant isolées. Le système équivalent correspond donc à un système infini avec des impulsions identiques en $x' + 2ne$ et $-x' + 2ne$; l'entier n variant de $-\infty$ à $+\infty$.

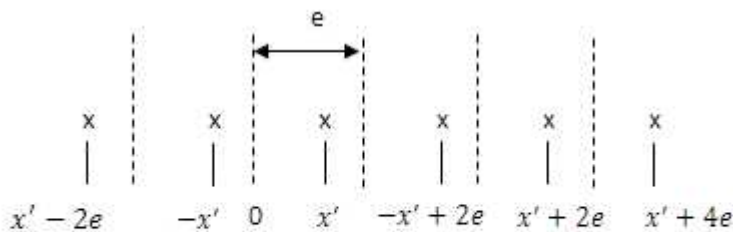


Figure 2 [10].

La fonction de Green est alors (à une dimension, pour simplifier) :

$$G(x, x', t - t') = \frac{1}{2\sqrt{\pi} (t-t')} \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(x-x'-2n)^2}{4\alpha(t-t')}\right] + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(x+x'-2n)^2}{4\alpha(t-t')}\right] \right) \quad (4)$$

Cette fonction de Green se met sous une forme plus opérationnelle par décomposition en série de Fourier, soit :

$$G(x, x', t - t') = \frac{1}{e} \left(1 + 2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\alpha n^2 \pi^2 (t - t') / e^2\right] \cos\left(\frac{n}{e}\right) \cos\left(\frac{n}{e}\right) \right) \quad (5)$$

La solution du problème est alors [10] :

$$T(x, t) = T_0 + \frac{\alpha \varphi_0}{\kappa_e} t + \frac{2e\varphi_0}{\kappa \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left[1 - \exp\left(\frac{-\alpha n^2 \pi^2 t}{e^2}\right) \right] \cos\left(\frac{n}{e}\right) \quad (6)$$

Références bibliographique :

- [1] Maurice D R and Courtney T H « Metallurgical and Materials Transactions, The Physics of Mechanical Alloying, A First Report » Volume 21, p289,1990.
- [2] Maurice D R and Courtney « Metallurgical and Materials Transactions, Modeling of mechanical alloying: Part I. deformation, coalescence, and fragmentation mechanisms » Volume 25, Pages 147-158, 1994.
- [3] D. Maurice et T. H. Courtney, « Fraisage dynamique: Partie 3. L'intégration de la modélisation locale et globale des dispositifs mécaniques d'alliages ». Volume 27, numéro 7, 1981-1986, 1996.
- [4] Courtney T H « TRANSACTIONS MÉTALLURGISTES ET DES MATÉRIAUX, Modélisation de la mécanosynthèse: Partie II. Développement de programmes de modélisation computationnelle » Volume 26, Numéro 9,1995.
- [5] Burgio N, Iasonna A, Magini M, Martelli S and Padella F Nuova Cimento « Alliage mécanique du système Fe-Zr. Corrélation entre les produits énergétiques et de fin d'entrée ». Volume 13, numéro, p459-476, (1991).
- [6] Magini M et Iasonna. « Le transfert d'énergie en alliage mécanique » JIM, vol. 36, n ° 2, 1995.
- [7] Iasonna A et Magini. « Les mesures de puissance au cours de l'usinage mécanique. Une façon expérimentale pour étudier les phénomènes de transfert d'énergie ». Acta Materialia, vol. 44, n ° 3, pp 1109-1117, 1996.
- [8] W. Guo, A. Iasonna, M. Magini, S. Martelli et F. Padella « Synthesis of amorphous and metastable Ti₄₀Al₆₀ alloys by mechanical alloying of elemental powders ». Volume 29, 2436-2444, Numéro 9 (1994),
- [9] M. Abdellaoui et E. Gaffet, La physique de mécanique d'alliage dans un broyeur planétaire: traitement mathématique, Acta Metall. Mater. 43, volume 3, p 1087 – 1098,1995.
- [10] Gaffet E, « Planetary ball-milling: an experimental parameter phase diagram ». volume 132, p 181-193,1991.
- [11] Gaffet E, Abdellaoui M and Malhouroux-Gaffet « N Mater. Trans. Formation of nanostructural materials induced by mechanical processing .vol. 36, n° 2,169, p198-209,1995.

- [12] Dallimore M P and McCormick P G, « Dynamics of Planetary Ball Milling: A comparison of computer simulated processing parameters with CuO/Ni displacement reaction milling kinetics » *JIM*, Vol.37 No.5 p1091-1098, 1996.
- [13] I. Manna, PP Chattopadhyay, B. Chatterjee et S. K. Pabi « Codeposition of nanocrystalline aluminides on a copper substrate » Volume 36, numéro 6, 2001.
- [14] D. Zidane, S. Bergheul, T. Rezoug, « Etude De La Variation De La Température de la Mécano Synthèse », 19ème Congrès Français de Mécanique, 2009
- [15] A.SULIMAN, Y.TANG, L.XU, « Preparation of ZnO nanoparticles and nanosheets and their application to dye-sensitized solar cells » .- *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2007
- [16] M.BALLAUFF, Y. LU- "smart" nanoparticles: Preparation, caractérisation et applications - *Polymer*, 2007.
- [17] Philippe Houdy, Marcel Lahmani, Catherine Bréchnignac, « Les nanosciences: Nanomatériaux », vol2, Belin,- 732 pages, janv. 2012
- [18] Sandrine Poux « Etude et caractérisation de nanomatériaux composites obtenus par encapsulation », 146 pages, paris, 2002
- [19] J. Barton, P. Bowen, C. Carry and J.M. Haussonne. « Traité des Matériaux, Volume 16, Céramiques et Verres : Principes et techniques d'élaboration » ISBN 2-88074-605-1, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2005.
- [20] Gilman P S and Benjamin J S Annu. « Mechanical Alloying: Rev. Mater. Sci ». 13 279, 1983 .
- [21] Zhang H, Liu G L and Qi K Z Chin « A first-principles study of the catalytic mechanism of the dehydriding reaction of LiNH₂ through adding Ti catalysts » : *Phys. B* 19 048601, 2010.
- [21] S. begin-Colin, F. Wolf, G. le Caer, J. « phys III. Mécanosynthèse d'oxydes nanocristallins » p 473. 1997.
- 22] K. Akkouche, mémoire de magistère, Université de Boumerdes, 2010
- [23] C. Suryanarayana, *Progr. Mater. Mechanical alloying and milling* : *Sci.* 46 .2001.
- [24] S. Lamrani, N. Maddache, mémoire d'ingénieur, Université de tizi Ouzou, 2008.
- [25] Christian Joachim, Laurence Plévert, « Nanosciences. La révolution invisible, Seuil, » Paris, 2008

- [26] Étienne Klein, compte rendu de conférence « L'avenir des nanotechnologies », l'Institut Diderot, le 12 janvier 2010.
- [27] Sophie Carencu Eric Gaffet Développons les nanomatériaux !, 67 pages, Paris 2012
- [28] Monfort-Windels, J. Lecomte. Les applications des nanotechnologies. Janv 2008.
- [29] B. Fultz, C.C. Ahn, E.E. Alp, W. Sturhahn, T.S. Toellner PHONONS IN NANOCRYSTALLINE 57FE : Phys. Rev. Lett. 79, p 937.1997.
- [30] Florin Popa, Elaboration et étude de poudres magnétiques douces (Ni-Fe, Ni-Fe-X, Ni-Fe-X-Y) à l'état nanocristallin par broyage mécanique de haute énergie, 181 pages, 2008
- [31] M. Lahlou-Mimi, J.M. Grenèche Computer simulation and magnetic frustration in cubic antiferromagnets : , J.M.M.M. 150, p 263, (1995)
- [32] J.M. Grenèche, J.M.D. Coey, J The topologically-disordered square lattice : . Phys. 51, p 231, 1990.
- [33] Tony McNally PhD , Nanomaterials in Aerospace Applications, School of Mechanical & Aerospace Engineering, Italy, 1/10/2010.
- [34] Nanomaterials for Aviation Industry: nanomaterials for aviation.P10. pdf. 10/2011.
- [35] Bernard Swoboda, Mécanique des moteurs alternatifs, Cours de L'Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs, Editions TECHNIP, 331 pages, 1984
- [36] Dominique Marchio, Paul Reboux, Introduction Aux Transferts Thermiques, Les Cours - École des mines de Paris, Presses des MINES, 210 pages, 2008
- [37] M. Abdellaoui and E. Gaffet, « A mathematical and experimental dynamical phase diagram for ballmilled Ni₁₀Zr₇ », Journal of Computational Physics, volume 209, pp.351-361, 1994.
- [38] C. Suryanarayana, « Mechanical alloying and milling », Progress in Materials Science, volume 46, pp.1-184, 2001.
- [39] D.A porter and K.E Easterling, « phase transformation in Metals and Alloys», Vannstrand Reinhold (UK), pp. 66-68, 1980.
- [40] A.K.Bhattacharya et E.Arzt, « temperature rise during mechanical alloying », scripta Metallurgica and Materialia, Volume 27, pp.749-754, 1992.
- [41] JR HARRIS , JAD Wattis et JV BOIS , «Une comparaison de différents modèles pour alliage mécanique », Acta materiala, volume 6 , pp . 6491-6503, 2000.
- [42] D. Maurice et Courtney, «The physics of mechanical alloying », Metallic Transaction, Volume 31,pp.389-303, 1990.

- [43] Sarah E. O'Donnell, « Impact of nanomaterials in airframes on commercial aviation. The MITRE Corporation Center for Advanced Aviation System Development, McLean, Virginia
- [44] Blue Road Research, Inc, "MNT-based sensors for aircraft/spacecraft structural health monitoring ", Concept paper 11a, CANEUS, 2006, www.caneus.org
- [45] Douglas C. Giancoli. Physique générale: « Mécanique et thermodynamique ». Page 568, 1993.
- [46] AFSSET, Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail – « Les nanomatériaux. Effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement » : p248 , Juillet 2006.
- [47] MORET R.- Nanomonde. « Des nanosciences aux nanotechnologies » Paris. p95.2006
- [48] SARGENT T. « Bienvenue dans le nanomonde ». Paris : Dunod, 2006 .- 201 p
- [49] Lu Sheng-Yong, Mao Qiong-Jing, Peng Zheng Li Xiao-Dong, and Yan Jian-Hua Chin. Chinese Physics B, Volume 21, Issue 7. « Simulation de mouvement et de transfert d'énergie à billes dans un broyeur planétaire à billes », 2012.
- [50] Piet Woelcken, Clemens Bockenheimer, Henrik Rösner, "Nanotechnology for future Airbus airframes", paper presented at Nanosolutions, Expo XXI, Cologne, 2006, 28- 30 November <http://www.nanosolutions-cologne.de/>
- [51] E. Gonsalves Associate Director S&T ONR Global-Americas Santiago, Chile NAVAIR Nano/Meta Materials Workshop for Naval Aviation Applications California, MD Feb 2-3, 2011.