



**RUPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**



**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du Diplôme

**MASTER EN AERONAUTIQUE**

Spécialité : Structure + Propulsion

---

**Etude de l'augmentation de la temperature dans un  
broyeur planétaire à billes**

---

**Présenté par :**

Touahria Miloud

Ahmed Bacha Chems eddine

**Encadré par :**

Dr ZIDANE DJILALI

Blida, juillet 2018

Figure 1.1 : Classification des nanostructures selon leur dimensionnalité.....	6
Figure 1.2 : Photographie du broyeur planétaire.....	9
Figure 1.3 : principe du broyage mécanique, formation d'agrégats par chocs mécaniques.....	11
Figure 1.4: Schéma de principe du broyage à haute énergie : alternance de déformations plastiques, fractures, collages.....	12
Figure 1.5 :Morphologie des poudres initiales : (a) Fe, (b) Al.....	12
Figure 1.6 :images MEB, des poudres Fe Al après 12 h de broyage.....	13
Figure 1.7 :images MEB, des poudres Fe Al après 24h de broyage.....	13
Figure 1.8 :broyeur type attriteur.....	15
Figure 1.9: a) Schéma simplifié d'un broyeur planétaire avec deux (02) jarres montées sur le plateau et b) mouvement de billes à l'intérieur de la jarre.....	16
Figure 1.10 : l'application des nanomatériaux dans aéronef.....	19
Figure 1.11 : Revêtement nano structuré.....	20
Figure 1.12 : l'application des nanomatériaux dans les Moteurs d'aéronefs.....	21
Figure 2.1.Schéma qui montre les positions de la bille sur la surface de la jarre au point initial de son mouvement (à t=0), détachement à (t=t1) et collision (à t1+t2).....	27
Figure 2.2 : Géométrie du plateau et de la jarre.....	29
Figure 2.3:décomposition de l'accélération absolue $\vec{\gamma}_a$ de la bille avant l'nstant de décollage dans la base $(\vec{U}_R, \vec{u}_r)$ .....	34
Figure 2.4 : la vitesse de choc de la bille pour un tour de rotation du plateau en fonction de la fréquence d'impact et pour diamètre de billes : d=10 mm et d=20 mm .....	39

Figure 3.1 : Schéma de la dynamique, fragmentation et de ressoudage des poudres lors du broyage .....	42
Figure 3.2 : les cinq étapes de l'évolution de la poudre durant la mécanosynthèse.....	45
Figure 3.3 : Fracture dynamique et ressoudage des poudres lors d'un choc bille-bille.....	49
Figure 3.4: les différentes étapes de l'évolution de poudres élémentaires sous broyage.....	49
Figure 3.5 : Représentation schématique de la prise de la poudre compacte entre la bille et la paroi pendant la collision.....	51
Figure 3.6: Représentation schématique de la poudre compacte .....	53
Figure 3.7: Assimilation de la bille à un corps semi-infini .....	54
Figure 3.8 : Assimilation de la poudre compacte à une plaque Plane à une dimension .....	56
Figure 3.9: Assimilation du système à une source plane instantanée .....	58
Figure 3.10 :Broyeur planétaire type PM 400.....	60
Figure 3.11 : Schéma de calcul de la température de broyage.....	64
Figure 4.1 : Température de contact des billes et de l'alliage des poudres AlTi en fonction de la vitesse de choc de la bille de broyeur planétaire «type PM 400 ».....	67
Figure 4.2 : Température de contact des billes des billes de l'alliage des poudres d'alliage ainsi que la vitesse de choc des billes, en fonction de la distance entre le centre du plateau et le centre de la jarred.....	70

Figure 4.3 : Températures de contacts des billes avec les poudres d'alliage AlTi, et la vitesse de choc des billes, en fonction du rayon de la jarre.....	72
Figure 4.4 : Energie d'impact en fonction de vitesse de choc pour diamètre des billes, (d = 10 et d = 20 mm).....	74
Figure 4.5 : Température de contact en fonction du rapport masse billes / masse poudre (RBP),.....	76
Figure 4.6 : Température de contact en fonction de la vitesse angulaire du plateau...	77
Figure 4.7 : Température de contact en fonction de l'énergie d'impact de la bille.....	78
Tableau 3.1 : Propriétés thermophysiques des billes et des poudres.....	61
Tableau 4.1.a: Variation de la température de contact en fonction de la vitesse de choc de la bille pour un diamètre de bille d = 20 mm;.....	65
Tableau 4.1.b: Variation de la température de contact en fonction de la vitesse de choc de la bille pour un diamètre de bille d = 40 mm ;.....	66
Tableau 4.2 : Variation de la température de contact et la vitesse de choc de la bille en fonction de la distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre rd.....	69
Tableau 4.3: Variation de la température la vitesse de choc de la bille en de contact et fonction de rayon de la jarre r_v ;.....	71
Tableau 4.4: Variation de l'énergie d'impact en fonction de la vitesse de choc de la bille pour diamètres des billes (d = 10 et d = 20 mm) ;.....	73

Tableau 4.5: Variation de la température de contact en fonction de rapport masse

billes sur masse poudre (RBP) ;.....76

Tableau 4.6: Variation de la température de contact en fonction de l'énergie d'impact;

.....79

## TABLES DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, FIGURES ET TABLEAUX

INTRODUCTION : .....	1
RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE .....	3
1.1. Introduction des nanomatériaux: .....	3
1.2. Définition des nanomatériaux: .....	3
1.3. Généralités sur les nanomatériaux: .....	4
1.3.1. Propriétés optiques: .....	4
1.3.2. Propriétés chimiques : .....	4
1.3.3. Propriétés électriques:.....	4
1.3.4. Propriétés magnétiques:.....	5
1.3.5. Propriétés mécaniques: .....	5
1.4. Classification des nanomatériaux :.....	5
1.5 Technique d'élaboration des nanomatériaux : .....	6
1.5.1 La voie physique:.....	6
1.5.2 La voie chimique : .....	7
1.5.3 La voie mécanique : Mécanosynthèse :.....	7
1.6 .Le broyage mécanique et la mécanosynthèse : .....	8
1.6.1 Quelle différence entre Le broyage mécanique et la mécanosynthèse :.....	8
1.6.2 Comment ça marche : .....	10
1.7 Différents types de broyeurs : .....	15

1.7.1 Broyeur attriteur : .....	15
1.7.2 Broyeur vibratoire : .....	15
1.7.3 Broyeur planétaire : .....	16
1.8.L'APPLICATION DES NANOMATERIAUX : .....	17
1.8.1 Applications des nanomatériaux dans l'aéronautique : .....	17
1.8.2 Autres applications aérospatiales des nanomatériaux : .....	22
1.9.Les risques lies aux nanoparticules: .....	22
<b>L'ETUDE CINEMATIQUE DU BROYEUR MECANIQUE</b>	
<b>TYPE PLANETAIRE</b> .....	23
2.1. Introduction : .....	23
2.2. Mouvement cinématique : .....	26
2.3. Modélisation du broyeur planétaire: .....	28
2.4. Vitesse absolue de la bille avant détachement : .....	30
2.5. Accélération absolue de la bille avant son décollage : .....	31
2.6. Critère de détachement de la bille : .....	32
2.6.1 Dans un repère fixe : .....	32
2.6.2. Dans un repère lié à la bille : .....	33
2.6.3.Accélération absolue et la réaction de la jarre dans la base vectorielle ( $UR, ur$ ) : .....	33
2.6.4.vitesse de détachement et accélération de détachement de la bille: .....	36
2.7.Cinématique d'impact : .....	37
2.8. Réinitialisation du mouvement de la bille: .....	38
2.9.fréquence d'impact: .....	38
2.10.Dynamique de la taille d'impact : .....	40
<b>LA TEMPERATURE EN MECANOSYNTHESE DANS LE BROYEUR</b>	
<b>PLANETAIRE</b> .....	42
3.1. Introduction : .....	42

3.2.Mécanosynthèse (Broyage à haute énergie) :.....	43
3.3. Les étapes de la mécanosynthèse: .....	43
3.4. Paramètres de broyage : .....	45
3.4.1. Nature des poudres: .....	45
3.4.2. Types de broyeurs:.....	46
3.4.3. Le rapport masse billes/masse poudre : .....	46
3.4.4.L'atmosphère de broyage: .....	47
3.4.5.Broyage continu – séquentiel: .....	47
3.4.6.La température de broyage : .....	47
3.4.7.Contamination de la poudre:.....	47
3.5. Principe de broyage à haut - énergie : .....	48
3.6. Application de la Mécanosynthèse :.....	50
3.7.Mode de Propagation de chaleur :.....	50
3.7.1 Conduction : .....	50
3.7.2 Convection :.....	50
3.7.3 Rayonnement :.....	51
3.8 Aspect thermique du processus de mécanosynthèse :.....	51
3.6 Modélisation thermique en mécanosynthèse : .....	53
3.6.1 Première approche (cas semi-infini) :.....	54
3.6.2 Deuxième approche (cas plaque plane) :.....	56
3.6.3 Troisième approche (cas source plane instantanée) : .....	58
3.7 Objectif:.....	59
3.8 Conditions de broyage:.....	61
3.9.Programme de calcul :.....	61
RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	65
4.1.Influence de la position angulaire du plateau :.....	65



4.1.1 Températures de contacts Bille-Bille et Bille-Poudre en fonction de la vitesse de choc :.....	65
4.2.Variation de la température en fonction de la distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre (rd) :.....	68
4.3. Variation du Rayon de la jarre: .....	70
4.4. Influence de la vitesse de choc sur l'énergie d'impact : .....	72
4.5. Variation de la température en fonction du rapport masse billes sur masse poudre (RBP) :.....	75
4.6. Variation de la température en fonction de la vitesse angulaire du plateau :....	77
4.7.Variation de la température de contact en fonction de l'énergie cinétique de la bille:.....	78
CONCLUSION :.....	80
PERSPECTIVES : .....	81
Liste des symboles et des abreviations.....	82
REFFERENCES .....	84

## **RESUME :**

La mécanosynthèse ou le broyage à haute énergie, est un procédé permettant d'agiter plus ou moins violemment une poudre et des billes contenues dans une enceinte étanche. Sous l'effet des collisions, les grains de poudre subissent alternativement des déformations plastiques, fractures et soudages les uns aux autres conduisant à la formation des matériaux nanométriques dans un état métastable.

Nous présentons dans cette étude, l'influence des paramètres de broyage sur la synthèse des matériaux dans un broyeur planétaire. La distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre, le rayon de la jarre, le rayon de la bille, le rapport masse billes sur masse poudre (RBP) et le rapport des vitesses angulaires entre les jarres et le plateau jouent un rôle important d'une part, sur l'efficacité du broyage, d'autre part, sur l'aspect thermique.

Ce travail a pour objectif de compléter des études expérimentales par des études théoriques, notamment le calcul de la température de contact au point d'impact des billes, en présentant deux modèles mathématiques.

## **ABSTRACT :**

Mechanical alloying or high-energy ball milling is a process it enables to agitate more or less violently a powder and balls inside a pot in which a powder is colliding. Powder particles are alternatively subjected to plastics deformations, fragmentations, and cold welding resulting nanometric novel materials with a metastable state.

We present in this study, the influence of milling parameters on the synthesis of materials in the planetary mill whose geometry and ratio of the angular velocities of the planetary and the system wheel play on the one hand, a crucial role in the milling performance and on the other hand, in the heating aspect.

The objective of this work is to complete experimental studies by the theoretical ones, especially the calculation of the contact temperature of balls impact by showing two mathematical models.

## ملخص:

إن التركيب الميكانيكي أو السحق بطاقة عالية هي عملية تسمح بتحريك بدرجة أكثر أو أقل عنف بودة وكريات موضوعة في نطاق مسدود. و تحت تأثير الصدم، تتعرض حبيبات المسحوق بتناوب إلى تحولات بلاستيكية، ثم إلى كسور و ألتحامها ببعضها البعض، يؤدي إلى تكوين مواد دقيقة جدا في حدود النانومتر وهي في حالة شبه مستقرة.

نحن بصدد تقديم في هذه الدراسة مدى تأثير عوامل السحق على تركيبة المواد في السحق الكوكبي التي تلعب فيه الهندسة و نسبة السرعة الدائرية بين الجرات و القاعدة من جهة دورا كبيرا في فعالية السحق، والحالة الحرارية من جهة أخرى.

هذا العمل يهدف إلى تكميل الدراسات التجريبية بالدراسات النظرية و خصوصا في حساب حرارة التلامس في نقطة تصادم الكريات و ذلك بتقديمنا نموذجين رياضيين.

## **REMERCIEMENTS :**

*Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu Clément et Miséricordieux de nous avoir donné la force et la volonté d'achever ce travail.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Mr Zidane qui nous a proposé le sujet de notre thèse et qui a bien voulu être notre promoteur.*

*Nous adressons, également nos sincères remerciements à nos familles ainsi que tous ceux qui ont contribué à notre formation de près ou de loin. Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin, nous présentons nos remerciements les plus distingués et nos salutations les plus chaleureuses à l'ensemble des enseignants du département d'aéronautique et des études spatiales de Blida.*

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

## INTRODUCTION :

Depuis une dizaine d'années, les nanomatériaux font l'objet d'une considération importante en raison que, cette nouvelle classe de matériaux offre une gamme de propriétés très prometteuses que celle des matériaux classiques à grain micrométrique dues essentiellement à la réduction importante de la taille des grains jusqu'à l'échelle nanométrique.

La particularité de ces matériaux est qu'ils présentent une amélioration simultanée des propriétés physiques et mécaniques, par comparaison à celles du matériau massif. Par exemple dans le domaine aéronautique, les équipements de génie électrique et magnétique à base de nanomatériaux, en plus de leurs grandes performances, possèdent un volume et un poids très réduit ainsi qu'une stabilité à des hautes températures. C'est un facteur déterminant dans le choix des équipements embarqués.

De nombreuses méthodes d'élaboration de ces matériaux se sont développées et parmi celle-ci la mécanosynthèse ou le broyage à haute énergie. Elle permet d'envisager une production à l'échelle industrielle en raison de son faible coût de mise en oeuvre et la facilité avec laquelle on peut élaborer de grandes quantités de matériaux. Cette technique d'élaboration constitue aujourd'hui un des modes d'élaboration d'alliage amorphe de composés intermétalliques ainsi que certains systèmes difficiles à aboutir par des méthodes classiques telle que la fusion-solidification.

Notre travail consiste essentiellement de faire une étude générale sur l'évolution de l'aspect thermique de la technique de mécanosynthèse et son processus de diffusion.

Notre étude est basée sur le calcul des différentes valeurs de températures des paramètres de broyage en tenant compte des propriétés thermophysiques des billes en acier dur inoxydable et de la poudre utilisée, on peut citer : la masse volumique, la conductivité thermique et la chaleur spécifique. La poudre utilisée pour le calcul de ces températures est l'aluminium et le titane utilisés en aéronautique.

Le chapitre 1 présente une revue bibliographique des connaissances actuelles sur les nanomatériaux, leurs propriétés et leurs modes d'élaboration, plus précisément la mécanosynthèse. La seconde partie du chapitre 1 porte sur l'évolution des connaissances de la température de broyage à l'intérieur de la jarre par utilisation de moyens électroniques de détection et d'enregistrement.

Le chapitre 2 est consacré au traitement mathématique dans le broyeur planétaire, en particulier l'étude cinématique du mouvement de la bille à l'intérieur de la jarre. Les paramètres de broyage jouent un rôle important dans la détermination des conditions de décollage et d'impact de la bille. Le même chapitre présente aussi, le rôle des composantes de la vitesse de la bille à l'instant d'impact sur la paroi de la jarre là où il y'a création d'une force tangentielle conduisant à un transfert effectif de l'énergie d'impact vers la charge de poudre synthétisée.

Dans le chapitre 3, nous étudions le phénomène de diffusion dans le processus de mécanosynthèse et qui admet en général deux facteurs importants, qui sont l'énergie d'activation liée à la formation des défauts de particules de poudre en broyage et la taille nanocristalline. La seconde partie du chapitre 3 porte sur l'intérêt des aspects thermiques rencontrés dans le processus de mécanosynthèse, ceci est modélisé en utilisant deux modèles mathématiques permettant de décrire le phénomène de l'augmentation de la température ainsi que le calcul de la température de contact au point d'impact des billes.

Le chapitre 4 traite les résultats obtenus et des courbes tracées avec commentaires.

Une conclusion générale résume les résultats obtenus.

# **CHAPITRE 01:**

## **Recherche**

## **Bibliographique**



### 1.1. Introduction des nanomatériaux:

Les nanotechnologies constituent un champ de recherche et de développement impliquant la fabrication de structures, dispositifs et systèmes à partir de procédés permettant de structurer la matière au niveau atomique, moléculaire ou supramoléculaire à des échelles caractéristiques de 1 à 100 nanomètres (nm). Ces constituants, encore appelés briques élémentaires, constituent une partie des nanomatériaux, relativement faibles en termes de quantité produite. Dans le domaine des nanomatériaux, il convient de considérer également les nanoparticules, les revêtements nanostructures ainsi que les matériaux massifs denses ou encore les nanocomposites (à matrice organique, inorganique ou encore métallique). De nouveaux comportements de la matière sont attendus, dus à la prépondérance des lois de la physique quantique, s'exprimant essentiellement à cette échelle. De nombreuses applications industrielles et médicales se développent à très grande vitesse et sont déjà, pour certaines, mises en œuvre actuellement. Ainsi, on peut considérer que l'avènement des nanosciences (nanotechnologies et nanomatériaux) constitue un tournant majeur dans le développement industriel du XXI<sup>e</sup> siècle.

### 1.2. Définition des nanomatériaux:

Il convient de définir un nanomatériau comme un matériau composé ou constitué de nano-objets (dont l'une au moins des trois dimensions physiques est comprise entre 1 et 100 nm) et présentant des propriétés spécifiques de l'échelle nanométrique.

Les nano-objets peuvent se présenter sous la forme de particules, fibres ou tubes (on parle de charges ou renforts), de couches minces ou de constituants structurels.

Les nano-objets sont utilisés soit en tant que tels (comme catalyseurs pour les réactions chimiques, comme vecteurs pour transporter des médicaments au niveau des cellules cibles, pour le polissage de « wafers » et disques durs en microélectronique...), soit en vue d'élaborer des matériaux.

### 1.3. Généralités sur les nanomatériaux:

Un des résultats basiques de la physique et de la chimie du solide est que les propriétés des solides dépendent de la microstructure, la composition chimique, l'arrangement des atomes et de la dimension du solide. Si un ou plusieurs des paramètres cités changent, alors les propriétés du solide changent aussi [1].

De ce fait, les nanomatériaux avec une taille de grains réduite et une haute densité d'interfaces acquièrent des propriétés qui souvent diffèrent de celles des matériaux conventionnels [2].

#### 1.3.1. Propriétés optiques:

Dans le domaine optique, la taille réduite des défauts modifie profondément les propriétés optiques, vers plus de transparence. Dans le cas des matériaux ferroélectriques, comme le titanate de baryum la combinaison d'effets dimensionnels (la taille des grains devient inférieure à une taille typique de domaine) et d'effets surfaciques (l'énergie de surface modifie la stabilité des phases) et la température de curie permet de définir une taille de grains optimale pour la permittivité diélectrique [3].

#### 1.3.2. Propriétés chimiques :

Les matériaux de taille nanométriques ont des propriétés chimiques qui diffèrent de celles des matériaux massifs [4].

#### 1.3.3. Propriétés électriques:

On peut moduler la résistivité des nanocomposites en contrôlant la taille des particules métalliques et la distance entre elles. Les composites préparés par Abeles et al [5] ont trouvé des applications comme résistance dans les circuits électroniques. Un des problèmes fondamentaux les plus étudiés est celui de la transition métal-isolant dans les particules métalliques nanométriques.

### 1.3.4. Propriétés magnétiques:

Parmi les propriétés magnétiques améliorées, l'amélioration du champ coercitif et l'aimantation rémanente dans les alliages nanostructurés lorsqu'on diminue la taille des particules. En effet, l'augmentation de la fraction atomique liée à la surface et/ou interface entraîne un effet de plus en plus important sur les propriétés magnétiques.

De même, les propriétés intrinsèques du matériau (aimantation spontanée, anisotropie magnétocristalline) sont fortement influencées par la taille des particules. Récemment, Murali [6] a observé un effet magnétique très élevé dans des nanocomposites à base de grenats de gadolinium.

### 1.3.5. Propriétés mécaniques:

Dans le domaine mécanique, la présence d'une multitude de joints de grains et de région intergranulaire en fraction volumique presque aussi importante que celle des grains eux-mêmes peut conduire, dans les métaux et les céramiques, à une dureté considérablement accrue ou, au contraire, à de très hautes températures à de la superplasticité. C'est l'une des motivations importantes des efforts actuels.

### 1.4. Classification des nanomatériaux :

Il convient de distinguer 4 grandes classes de nanomatériaux (voir . Figure 1.1) en fonction de la dimensionnalité :

a) Dimension 0 : cette classe de nanomatériaux recouvre les nanoparticules de dimension inférieures à la centaine de nanomètres.

b) Dimension 1 : Nous retrouvons les fibres ultrafines, les nanotubes. Le diamètre de ces objets est de quelques dizaines de nanomètres pour une longueur atteignant désormais quelques millimètres.

c) Dimension 2 : Ce sont les dépôts en couches minces. Nous retrouvons dans cette catégorie les multicouches pour applications électroniques mais également depuis une dizaine d'années, les revêtements « hyperdurs » pour applications mécaniques (résistance au frottement et/ou à l'abrasion).

d) Dimension 3 : Les nanomatériaux massifs constituent cette classe. Nous y ajouterons également les poudres microniques nanostructurées essentiellement produites par des procédés mécaniques de type mécanosynthèse. Nous pourrions introduire dans cette classe tous les revêtements épais (de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres). Ces revêtements peuvent être élaborés par voie électrochimique ou par déposition par voie plasma.

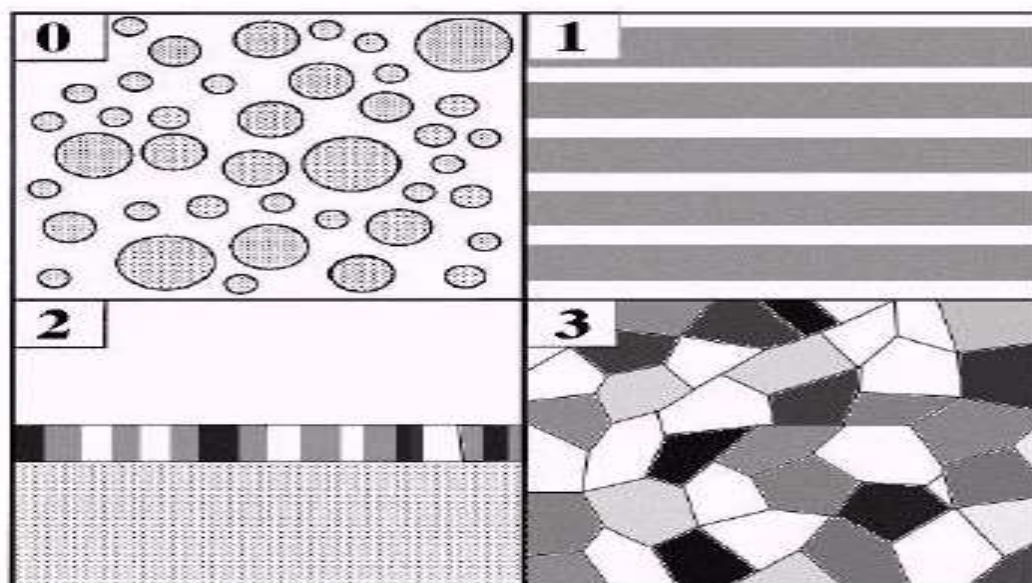


Figure 1. 1: Classification des nanostructures selon leur dimensionnalité [4].

### 1.5 Technique d'élaboration des nanomatériaux :

L'élaboration des matériaux nanostructurés est largement utilisée dans l'industrie, et surtout dans la recherche, les principaux objectifs étant la réduction de la taille des particules, un mélange de poudres ou une modification de la forme des particules et amélioration de leurs tailles par rapport à celles des matériaux massifs ces dernières années. Les procédés d'élaboration se trouvent sous plusieurs voies:

1. La voie physique
2. La voie chimique
3. La voie mécanique : *Mécanosynthèse*

#### 1.5.1 La voie physique:

L'élaboration des nanoparticules peut être réalisée à partir d'une phase vapeur extraite d'un matériau source par chauffage ou par bombardement. Dans la plupart des cas, la vapeur du solide que l'on souhaite former est refroidie par collisions avec un gaz neutre et le matériau est collecté sur une paroi froide . Une autre voie d'obtention de nanopoudres consiste à utiliser l'action de micro-ondes sur des poudres de taille millimétrique. Des couches minces d'épaisseur nanométrique peuvent également être

réalisées par la voie PVD (Physical Vapor Deposition). Les nanotubes de carbone peuvent être obtenus par ablation laser, décharge plasma ou décomposition catalytique.

### 1.5.2 La voie chimique :

Plusieurs techniques de fabrication sont couramment utilisées dans l'industrie. Dans les réactions en phase vapeur, les matériaux précurseurs vaporisés sont introduits dans un réacteur CVD (Chemical Vapor Deposition) dans lequel les molécules de précurseurs sont adsorbées à la surface d'un substrat maintenu à une température adaptée. Les réactions en milieu liquide donnent lieu à des synthèses et sont le plus souvent effectuées à partir d'une solution aqueuse ou organique contenant les réactants. La précipitation des nanoparticules est obtenue par une modification des conditions d'équilibre physico-chimique.

### 1.5.3 La voie mécanique : Mécanosynthèse :

Mécanosynthèse permet de synthétiser, à température ambiante, des matériaux organisés à l'échelle nanométrique, difficiles, voire impossibles à obtenir par des méthodes classiques telles que la fusion-solidification. Cette nouvelle méthode de synthèse a été développée dans les années 60, par John Benjamin pour réaliser des dispersions d'oxydes ( $Al_2O_3, Y_2O_3$ ) dans des alliages de nickel dans le but de renforcer leurs propriétés mécaniques.

Deux terminologies sont employées pour définir le broyage à haute énergie: on parle de **mécanosynthèse** ("mechanical alloying" en anglais), quand les poudres initiales ont une composition différente de celle(s) d'arrivée, et de "**mechanical milling**", dans le cas contraire .

### 1.6 .Le broyage mécanique et la mécanosynthèse :

#### 1.6.1 Quelle différence entre Le broyage mécanique et la mécanosynthèse :

Il existe une nuance entre les deux nominations « broyage mécanique » et «mécanosynthèse ». Le broyage mécanique est un procédé de préparation des matériaux sous forme de poudre permettant la réduction de la taille des particules par la fracture des grains grâce à l'énergie mécanique qui leur est transmise pendant la collision des billes en mouvement. L'effet du broyage mécanique est différent selon la ductilité du matériau et la forme des particules . Ainsi, celles-ci sont facilement cassables si elles sont fragiles et auront tendance à être déformées ou agglomérées dans le cas d'un matériau mou comme l'étain. De même une particule sphérique est moins facilement cassée vu sa disposition à être éjectée par les deux billes par rapport à une particule allongée qui elle reste bloquée. Le broyage mécanique permet également de réduire la cristallinité d'un matériau et peut même produire son amorphisation.

La mécanosynthèse quant à elle, est une technique de synthèse par broyage mécanique qui consiste à mélanger des poudres de différents métaux ou d'alliages ou de composites pour les faire réagir entre eux moyennant une haute énergie. Elle permet de transformer l'énergie mécanique en énergie chimique. Ainsi, des réactions se produisent entre les différentes phases présentes grâce aux fractures puis soudages répétés des particules qui multiplient les interfaces favorisant la diffusion des éléments à l'échelle atomique et par conséquent l'apparition de nouvelles phases avec une bonne

homogénéisation du mélange. **Le temps requis pour une mécano synthèse est typiquement plus élevé que dans un broyage mécanique.**

Quatre éléments sont nécessaires pour élaborer des matériaux par mécano synthèse :

- Des podres élémentaires ou préalliiées constituant le produite à élaborer.
- Un moyen de choc : des billes ou des barreaux suivant la technique adopté .
- Un type de mouvement permettant des chocs successifs : chocs aléatoires par les palettes (cas des attriteurs) ou mouvement de collage-décollage (cas des broyeurs planétaires, broyeurs horizontaux et vibratoires ).
- Un container dans lequel se fait la mécanosynthèse (des jarres dans le cas des broyeurs planétaire , des cylindres dans le cas des broyeurs horizontaux.

- attriteure et verticaux (vibratoire à une dimension ) et enfin des cellules dans le cas des broyeurs vibratoires à une dimension type « spex »).

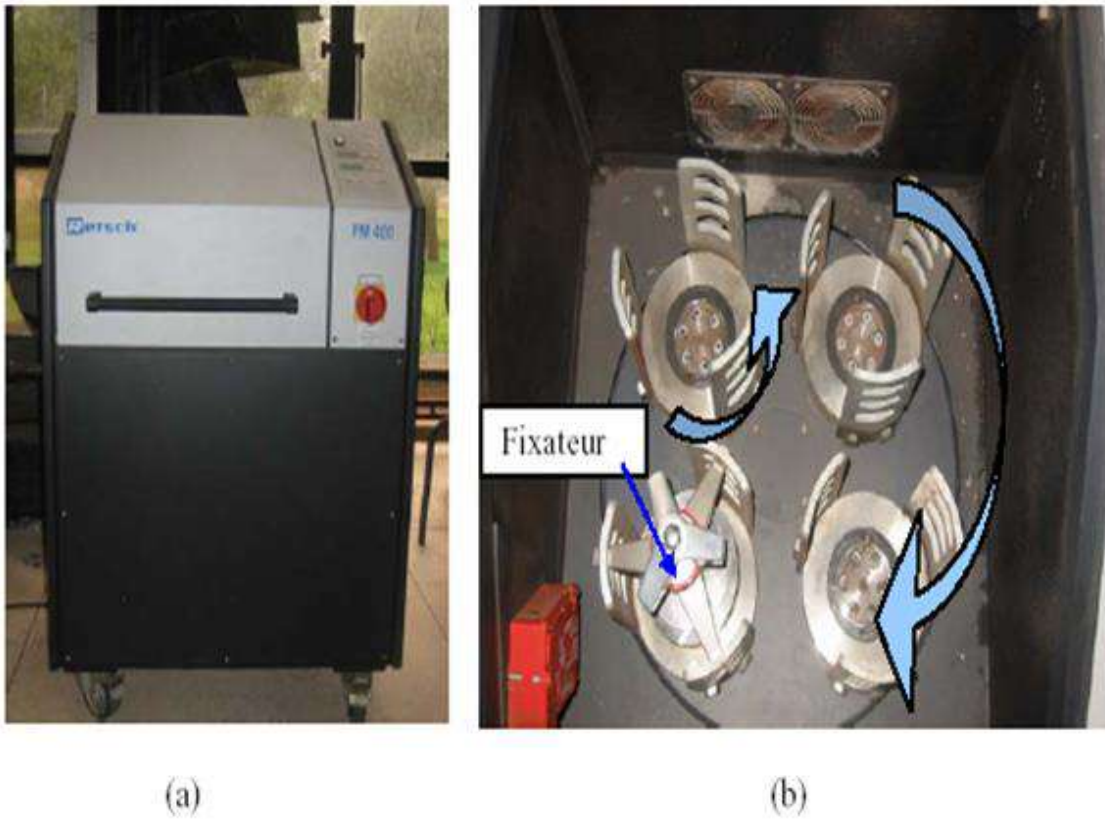


Figure 1. 2: Photographie du broyeur planétaire.

- (a) broyeur planétaire FRITSCH PM400,  
(b) présentation schématique du mouvement du plateau et des jarres.

### 1.6.2 Comment ça marche :

Il suffit de placer la ou les poudre(s) à broyer avec les proportions désirées dans une jarre, généralement en acier inoxydable ou en agate, avec des billes de la même nature. La taille des particules doit être évidemment inférieure à celle des billes. Le mouvement des billes, suivant des trajectoires variables, résulte en des collisions entre elles emprisonnant les particules et provoquant la déformation plastique, la fracture puis l'agglomération des particules de la poudre sous les contraintes de chocs. La collision de deux billes au sein d'une jarre. Ces trois phénomènes sont répétés plusieurs fois tout au long du broyage jusqu'à atteindre une taille critique pour laquelle la tension de surface des particules est supérieure à la force nécessaire pour la fracture. Une stabilisation de la taille des particules est donc observée. La poudre subit donc, au cours du broyage, de sévères déformations plastiques qui engendrent la formation de nombreux défauts ponctuels (lacunes, interstitiels . . .), ainsi que des bandes de cisaillement constituées de réseaux de dislocations. La contrainte minimale nécessaire pour déformer plastiquement un matériau peut s'écrire selon la Loi de HallPetch[7].

$$\sigma = \sigma_0 + K d^{-1/2}$$

$\sigma_0$  : Limite d'élasticité du monocristal,  $N/m^2$  ;

$K$ : Coefficient qui dépend du matériau ;

$d$  : Diamètre du grain, nm.



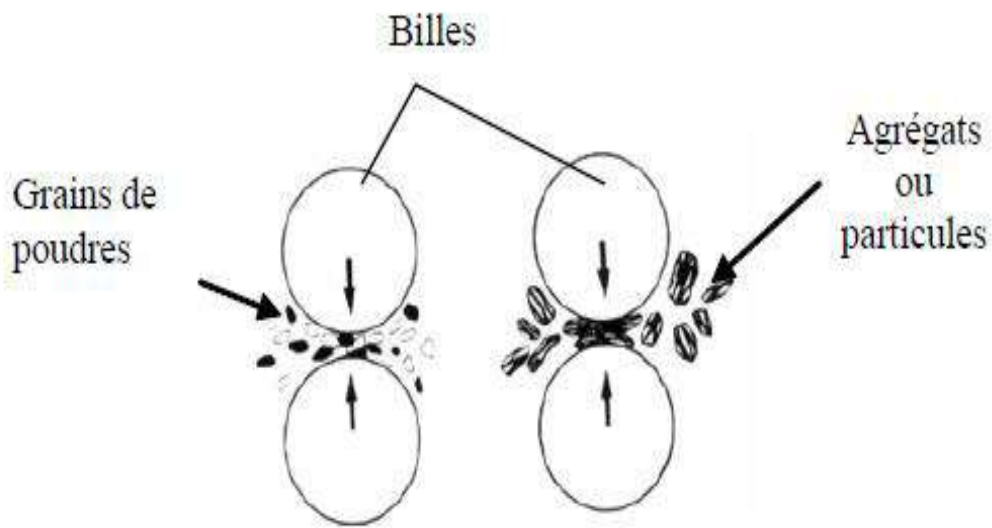


Figure 1. 3: Principe du broyage mécanique, formation d'agrégats par chocs mécaniques [4].

Après un certain temps de broyage, le matériau atteint un état dit « stationnaire », caractérisé par des propriétés structurales (taille de grains, paramètre d'ordre à courte ou longue distance, concentration d'éléments en solution, taux de matériau amorphes...) qui ne varient plus. Celles-ci, ainsi que le temps nécessaire pour atteindre l'état stationnaire, dépendent de la composition chimique du matériau et des conditions expérimentales du broyage,

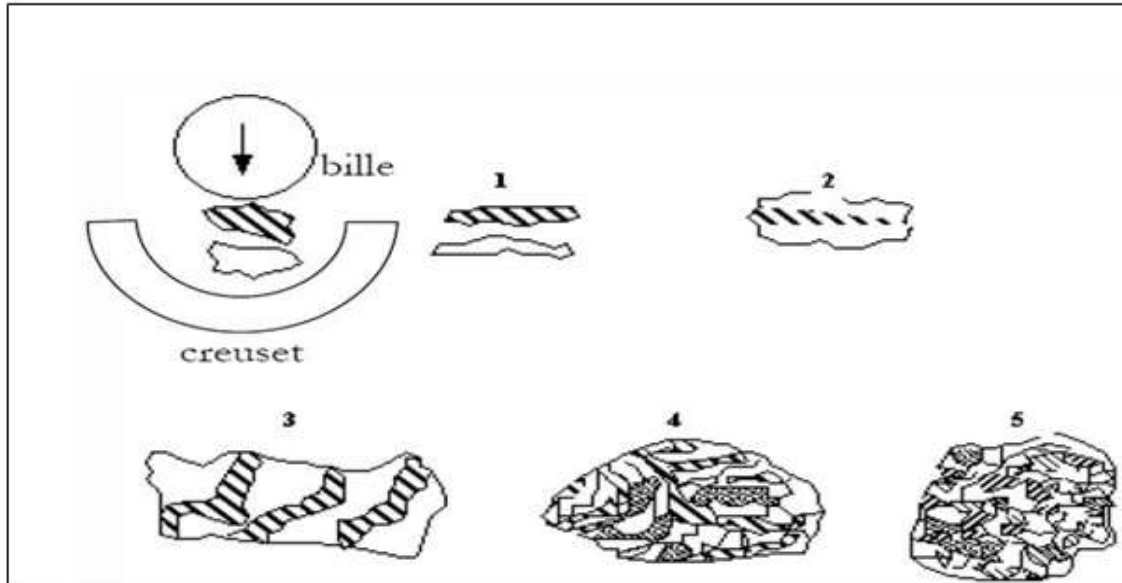


Figure 1. 4: Schéma de principe du broyage à haute énergie : alternance de déformations plastiques, fractures, collages[25].

•Stade initial :

Durant ce stade, des particules de poudres sont aplaties par la force de compression due à la collision des billes

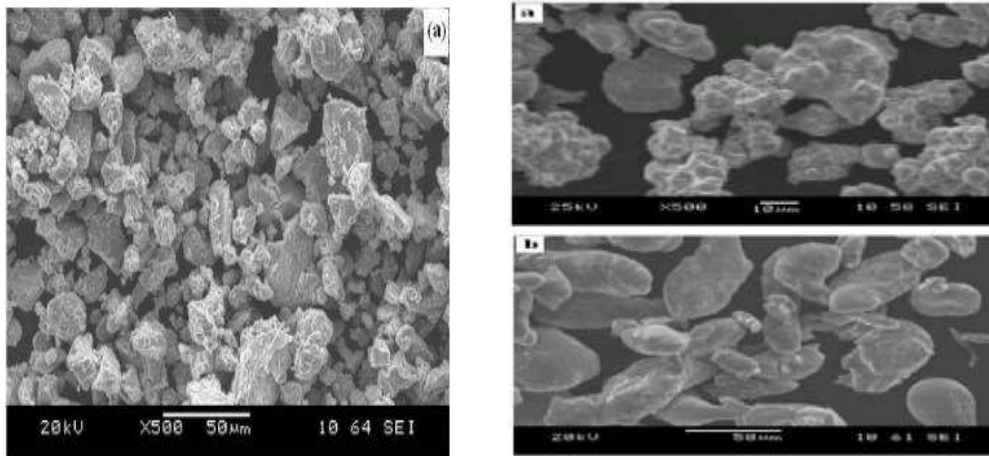


Figure 15. : Morphologie des poudres initiales: (a) Fe (b) Al.

### •Stade intermédiaire :

Le changement significatif qui se produit durant ce stade est mis en évidence par la différence de la morphologie des particules par rapport à celle du stade initial. Le processus de soudage est important et la déformation plastique conduit à la formation de structure lamellaire dans le cas du mélange ductiles-ductiles. Les processus de fracture et de soudage sont dominants à ce stade (orientation aléatoire des lamelles). Ainsi, le phénomène de fracture entraîne la diminution de l'épaisseur des lamelles.

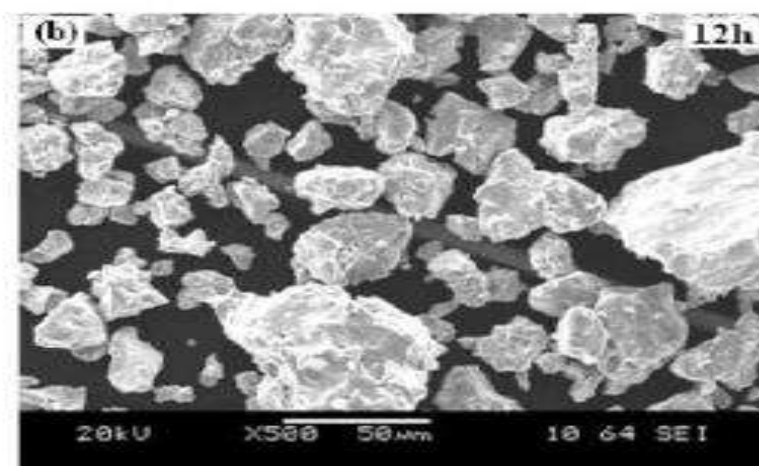


Figure 1. 6: image MEB, des poudres Fe Al après 12 h de broyage.

### •Stade final :

Un affinement considérable et une diminution de la taille des grains sont évidents à ce stade. La microstructure paraît plus homogène à l'échelle macroscopique que celle de stade initial et stade intermédiaire.

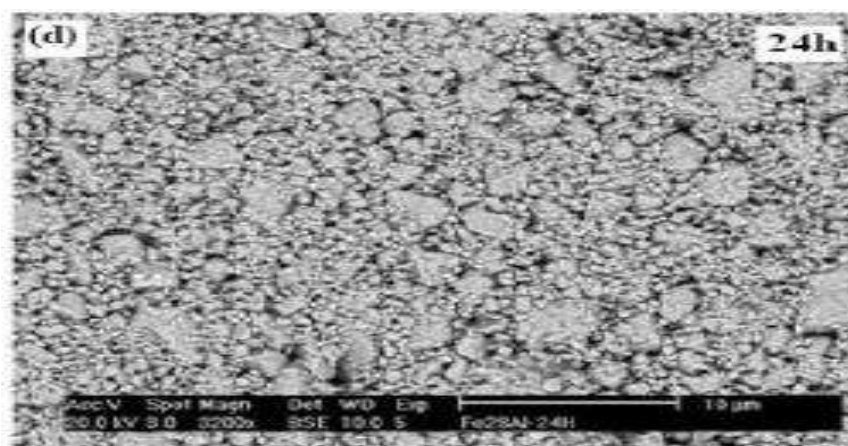


Figure 1. 7: images MEB, des poudres Fe Al après 24h de broyage.

## *Chapitre 01:Recherche Bibliographique*

---

Le contrôle de la morphologie, de la microstructure, de l'état de cristallinité, de l'état de division et des phases désirées est possible grâce à la panoplie de paramètres à varier:

- Type de broyeur : il en existe plusieurs différenciés par le mouvement qu'ils effectuent soit vibratoire, planétaire ou même en forme de boucles (Spex).

- Vitesse de broyage : l'augmentation de la vitesse de rotation fait augmenter automatiquement celle des billes au sein de la jarre. Toutefois, il faut trouver une vitesse adéquate pour laquelle les billes retombent au fond de la jarre et interagissent avec la totalité de la poudre.

- Temps de broyage : c'est un des paramètres les plus importants, il dépend de la vitesse du broyage, de la température d'opération, et du rapport massique billes/poudre. Des temps courts de broyage sont généralement souhaités vu le risque de contamination de la poudre par le matériau de la jarre.

- Taille des billes : l'énergie du broyage augmente avec l'augmentation de la taille des billes. Un mélange de différentes tailles de billes est possible, cela permet de diminuer l'agglomération de la poudre.

- Atmosphère au sein de la jarre : il est possible de choisir différentes atmosphères inertes ou réactives selon le besoin. Pour éviter l'oxydation ou la contamination des poudres, il est commun d'utiliser de l'argon ou de l'hélium alors que par exemple, pour synthétiser des hydrures, de l'hydrogène est introduit dans la jarre de broyage

- Rapport massique billes/poudres : ce rapport est inversement proportionnel au temps de broyage pour obtenir des produits de broyage semblables. En effet, plus il y a de billes, plus des chocs se produisent augmentant l'énergie de fracture dans la jarre et plus vite les éventuelles réactions chimiques ont lieu.

- Remplissage de la jarre : il faut laisser un volume libre pour le mouvement des billes. Typiquement un remplissage de la moitié de la jarre est réalisé.

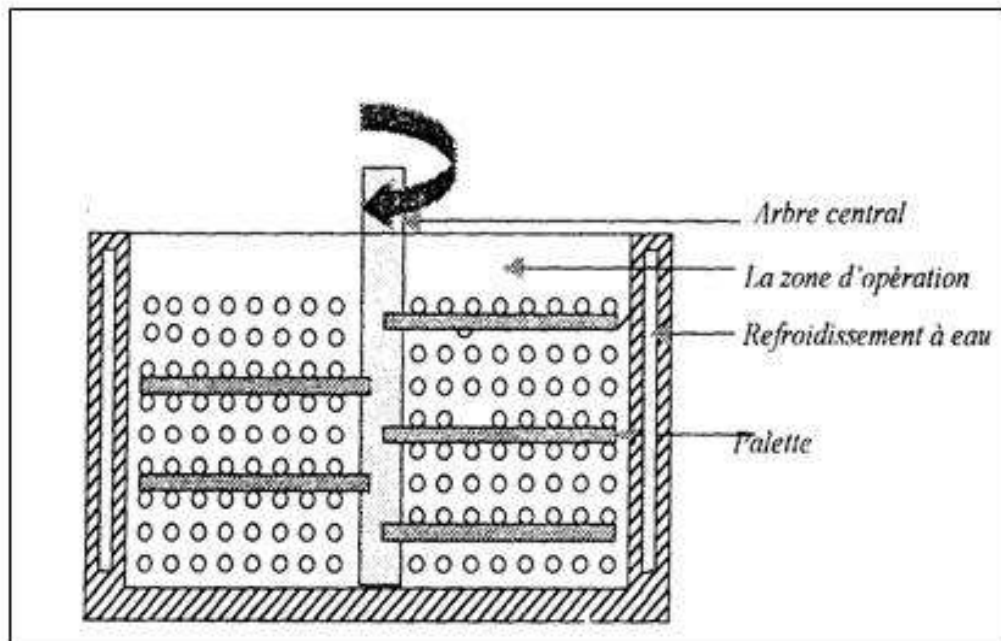
- Choix de l'agent de contrôle : sous forme de lubrifiants, des agents comme le carbone, des alcools, ou des produits organiques peuvent être ajoutés pour diminuer l'effet de l'agglomération surtout pour les matériaux mous.

### 1.7 Différents types de broyeurs :

Différents types de broyeurs peuvent être utilisés comme les broyeurs attriteurs, où les billes sont mises en mouvement par l'intermédiaire de palettes en rotation, ou encore les broyeurs vibrants où le mouvement des billes est provoqué par des vibrations haute fréquence. Il y a un troisième type de broyeur, un broyeur planétaire, où le mouvement des billes résulte de la rotation de la jarre.

#### 1.7.1 Broyeur attriteur :

Dans ce type de broyeur, les billes sont activées par des palettes liées à un arbre central vertical tournant. La vitesse de rotation de l'arbre vertical central atteint 1000 tr/min. La zone d'opération est cylindrique, les surfaces latérales sont refroidies avec de l'eau froide circulant dans une enveloppe.



*Figure 1. 8:broyeur type attriteur .*

#### 1.7.2 Broyeur vibratoire :

Le principe de ce broyeur est basé sur un mouvement vibratoire à haute fréquence d'un cylindre contenant la poudre et les billes. Le broyeur le plus utilisé est le SPEX 8000 Ce dernier peut traiter une certaine quantité de poudre dans un temps relativement court.



Figure 1. 9: broyeur vibratoire type SPEX 8000.

### 1.7.3 Broyeur planétaire :

Dans lequel une dizaine de billes de 1 à 2 cm de diamètre sont placées avec la poudre dans une enceinte, solidaire d'un disque qui tourne en sens opposé à elle. Le broyage agit soit par chocs, soit par frottement.

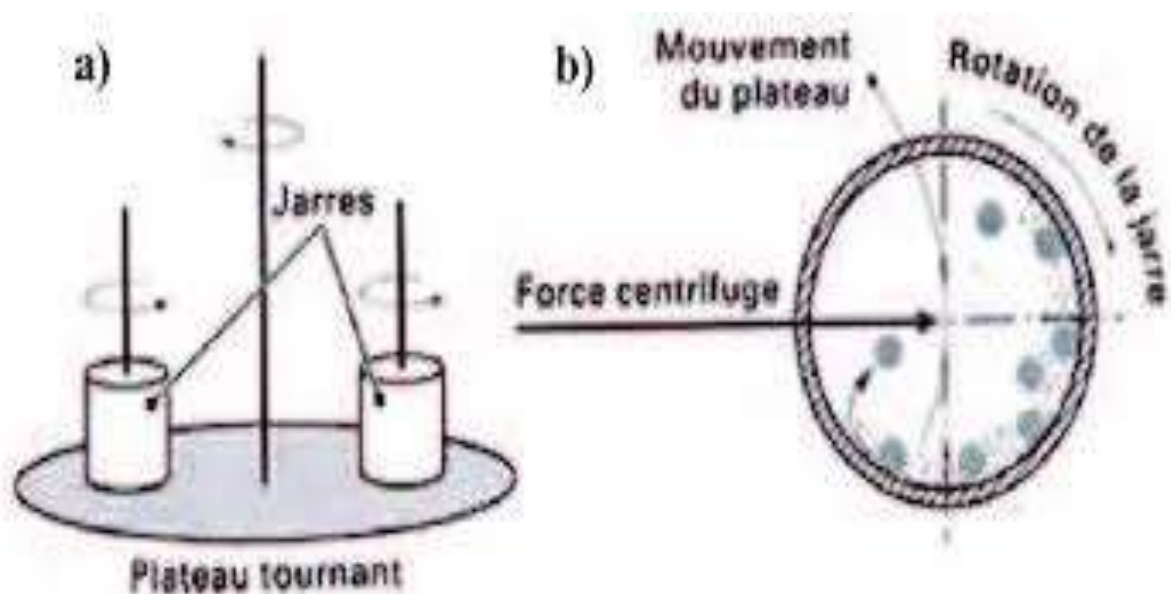


Figure 1. 10: a) Schéma simplifié d'un broyeur planétaire avec deux (02) jattes montées sur le plateau et b) mouvements de billes à l'intérieur de la jatte[47].

### 1.8.L'APPLICATION DES NANOMATERIAUX :

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

#### 1.8.1 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. [9]

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. [9]

Les nanomatériaux peuvent être utilisés principalement dans quatre domaines de l'industrie de l'aviation [10] :

- A. Structure de l'aéronef ;
- B. Revêtements et les peintures ;
- C. Moteurs et pièces de moteurs et 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 [11], quelque exemple sont cités :

- Nano-composites polymères (NTC, BN, NCF) pour une haute résistance au poids, résistance élevée aux chocs et la protection contre les rayonnements ;
- L'auto-guérison ou la réparation des matériaux ;
- Nanocomposites à base d'argile pour renforcement structurel et résistance à la chaleur ;
- Nanomatériaux pour l'absorption acoustique ;
- Revêtements métalliques nanostructurés pour train d'atterrissage, une meilleure résistance à la corrosion et d'usure ;
- Dépôt de nanopoudres sur les surfaces vitrées (nettoyage auto et antiéblouissement)
- Des métaux et des céramiques nanorenforcer, afin d'améliorer la fragilité et la ténacité [12]



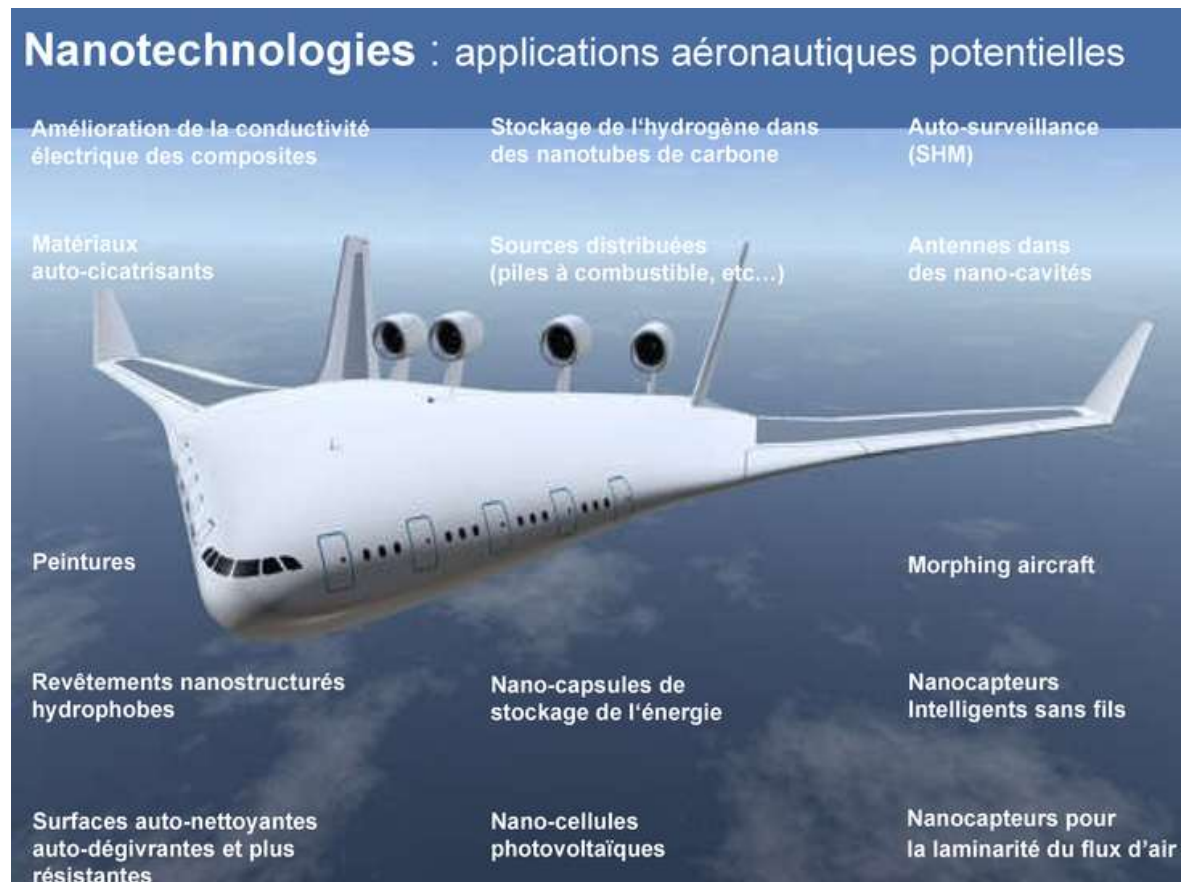
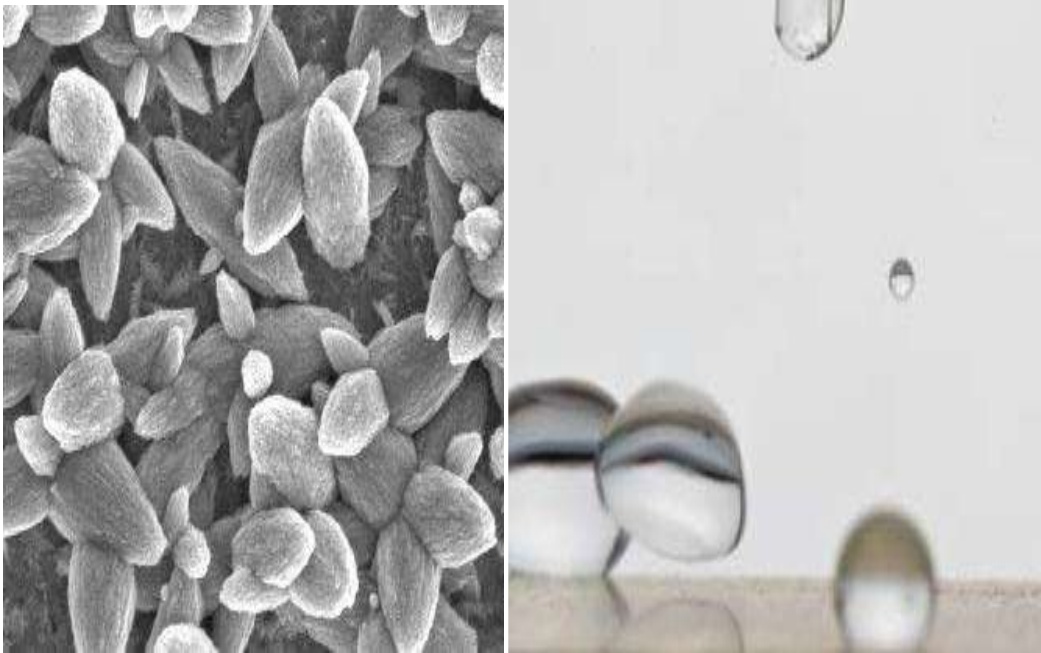


Figure 1. 11: l'application des nanomatériaux dans aéronef.

## B. Revêtements et les peintures :

Céramique déjà en usage ; par exemple  $ZrO-8mol\% Y_2O_3$  dans les revêtements pour turbines à gaz et des jupes moteurs à réaction. [10] 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 ; [13]
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. [13]



*Figure 1. 12: Revêtement nano structuré.*

### C. Moteurs et pièces de moteurs :

On cite quelques applications des nanomatériaux dans la motorisation [14] :

- 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 :

- 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 ;
- Réduction des coûts. [15]

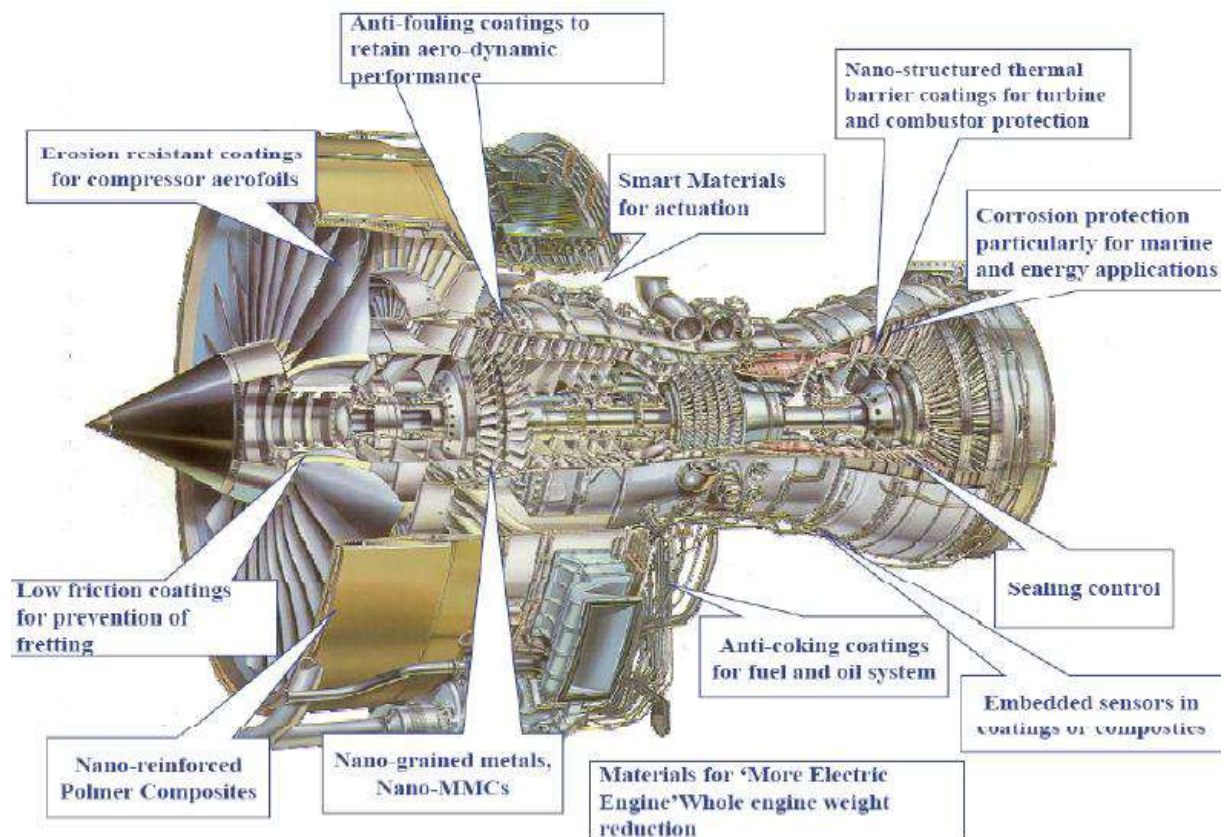


Figure 1. 13: l'application des nanomatériaux dans les Moteurs d'aéronefs.

### D. Équipement intérieur et de l'ameublement :

Le développement des nanotechnologies est à l'origine de plusieurs évolutions capitales dans le domaine de sécurité, de confort et d'hygiène. [16]

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-microbienne, exemple : des nanoparticules d'argent pour les selleries et les tapis [17] ;
- 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 [17].

### 1.8.2 Autres applications aérospatiales des nanomatériaux :

- Ajout de nanoparticules (Al à l'hydrogène liquide) pour augmenter l'énergie de propulsion ;
- Ajout de nanoparticules (oxyde de fer) comme un catalyseur pour les propergols solides ;
- Les lubrifiants, non dangereux nano-fluides pour une utilisation hydraulique ;
- Les textiles techniques (vêtements et des équipements pour l'exploration spatiale) ;
- Les appareils électroniques nanométriques (batteries longue durée) ;
- Nanomatériaux pour fournir une protection contre le rayonnement cosmique [17] ;

### 1.9 LES RISQUES LIÉS AUX NANOPARTICULES:

Les hommes vivent en permanence et depuis toujours dans une atmosphère chargée de nanoparticules : nanoparticules d'origine naturelle (poussières de sable, de sel marin, d'origine végétal, émises lors d'incendies ou d'éruption volcaniques) ou nanoparticules liées à des activités humaines (feux de bois, condensation de gaz d'échappement des véhicules à moteur, chauffage urbain, etc.).

Ainsi, que soit en milieu rural ou en milieu urbain, chaque litre d'air que nous inspirons contient plusieurs millions de nanoparticules, parfois beaucoup plus, en milieu urbain fortement pollué par exemple.

On connaît depuis longtemps les maladies pulmonaires plus ou moins graves provoquées par l'inhalation de poussières de taille micrométrique (entre 1 et 100  $\mu\text{m}$ ), notamment en milieu professionnel : pneumoconioses, cancers broncho-pulmonaires ou de la plèvre, pour ne citer que les principales.

Certaines poussières ont ainsi une toxicité bien démontrée : poussières de fer, de béryllium, de charbon, de silice, d'amiante ou autres poussières minérales, poussières organiques, etc. [4]

Dans le cas d'une exposition respiratoire, la littérature évoque la possibilité d'un passage dans la circulation sanguine des particules de taille nanométrique. Cette affirmation est controversée et la question reste ouverte. Les particules nanométriques peuvent également s'introduire dans le système nerveux central.

## *Chapitre 01: Recherche Bibliographique*

---

D'après une expérience menée sur des rats exposés par voie inhalée pendant 6 heures à un aérosol de particules de graphite marquées avec un isotope radioactif, on observe une augmentation de la radioactivité dans les poumons mais aussi la présence d'environ 20 % de radioactivité dans le bulbe olfactif.

Cette étude a été approfondie en menant une expérience avec un aérosol de particules d'oxyde de manganèse pendant 12 jours. On a alors noté une accumulation de manganèse dans le poumon, dans le bulbe olfactif et dans plusieurs régions du cerveau (striatum, cervelet, lobe frontal).

Les propriétés physico-chimiques des nanomatériaux sont des déterminants majeurs de leurs potentiels effets délétères sur la santé ; la taille étant l'une des propriétés les plus importantes dans ce sens.

Une étude portant sur des rats exposés à des particules de noir de carbone de 14 nm et de 320 nm de diamètre, pour une quantité fixe de 500µg, a montré une augmentation de cellules inflammatoires pour les rats exposés aux nanoparticules de 14 nm tandis que cette même réaction ne s'observait pas dans l'autre groupe.

En raison de leur très petite taille, les nanoparticules peuvent présenter des propriétés physicochimiques totalement originales. [1] Une première caractéristique est leur forte réactivité. De façon générale, à volume total identique, celle-ci sera d'autant plus élevée, notamment avec les tissus biologiques, que leur taille individuelle est petite (rapport surface/volume élevé).

Une seconde caractéristique est liée à l'instabilité de leurs propriétés physico-chimiques, selon leur milieu. Pour les plus fines, les forces d'interaction augmentent lorsque la dimension diminue. Ainsi, des nanoparticules introduites dans un gaz ou dans des solutions liquides vont s'agglutiner ou absorber des substances chimiques en suspension, modifiant leurs propriétés initiales.

À l'inverse, la dispersion par usure des nanoparticules incluses dans des supports (peinture, pneumatiques ...) est peu connue. Au total, il semble impossible de dresser un modèle standard : chaque nanoparticule engendre des effets (notamment toxicologiques) spécifiques, et la réponse biologique croît avec leur surface et leur longueur

# **CHAPITRE 02:**

**L'étude**

**cinématique du**

**broyeur mécanique**

**type planétaire**

## *Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire*

---

### 2.1. Introduction :

Dans ce deuxième chapitre, une analyse mathématique est présentée. Elle permet de comprendre l'opération de broyage dans le broyeur planétaire, en terme d'étude du mouvement de la bille dans le plan cartésien, et afin de dégager les éléments essentiels (vitesse, température, etc....) pour l'étude de l'aspect thermique de la mécanosynthèse. Des calculs ont montré le rôle des paramètres de broyage dans la détermination de la condition de décollage de la bille à partir de la paroi de la jarre. La condition d'impact « effectif » de la bille a été établie en terme du rapport vitesse de rotation de la jarre sur celle du plateau. Une autre étude montre aussi le rôle des composantes de la vitesse de la bille à l'instant d'impact sur la paroi de la jarre. La force tangentielle détermine le rapport des vitesses angulaires de la jarre et du plateau, ce qui conduit à un transfert effectif de l'énergie d'impact vers la charge de poudre dans le broyeur planétaire [18].

La mécano synthèse est une voie versatile permettant de synthétiser des matériaux sous forme de poudre de taille nanométrique ayant une nouvelle composition d'alliage et une microstructure métastable [19]. Cette nouvelle synthèse est due à une grande énergie de broyage, elle résulte d'un processus répété de déformation, fragmentation et soudage [19].

Dans le passé, plusieurs essais ont été entrepris afin de simuler la dynamique du processus de broyage à billes en termes de vitesse de choc, fréquence d'impact et la puissance / énergie cinétique transférée à la poudre durant le broyage [20,21].

Maurice et Courtney [20] et Courtney [22] ont simulé les mécanismes de broyage en se basant sur le critère hertzien d'impact pour prédire le volume du matériau affecté par impact, la durée d'impact, le taux de résistance et le taux d'élévation et de refroidissement de la température. Ces auteurs ont fait une analyse sur des aspects phénoménologiques des collisions entre deux billes et/ou une bille avec la paroi de la jarre, c'est-à-dire la cinématique du mouvement de la bille.

D'un autre coté, Burgio et al [23] ont déduit un ensemble d'équations pour faire une étude cinématique et calculer la vitesse et l'accélération de la bille dans le broyeur planétaire, ainsi ils ont estimé l'énergie transférée aux particules de poudre. La distribution de la bille à l'intérieur de la jarre, est considérée comme indépendante de l'étude cinématique de son mouvement.

## *Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire*

---

Cependant, cette analyse ne fournit pas un principe gouvernant qui prédit une condition optimale de broyage que nous allons tenter d'approfondir par nos travaux.

Par la suite, Abdellaoui et Gaffet [24], Gaffet [25] et Gaffet et al. [26] ont suggéré à travers des analyses plus rigoureuses que la puissance de choc de la bille plutôt que l'énergie cinétique, peut définir la fin du produit synthétisé et l'efficacité du broyage.

Ainsi, ces auteurs se sont basés sur quelques paramètres important de l'étude cinématique, comme la variation de la vitesse angulaire du plateau et celle de la jarre en fonction de la vitesse de choc des billes. Ils déterminent ainsi la quantité effective de la puissance / énergie transférée aux particules de poudre durant l'événement du choc.

Dans ce même esprit, Besset et al. [27] proposent que l'estimation de la vitesse de choc soit déterminée expérimentalement à partir de la quantité de matière arrachée des billes.

Magini et Iasonna [28], Iasonna et Magini [29], et Magini et al. [30] ont considéré les mêmes conditions cinématiques déjà proposées par Burgio et al. [23], ils ont alors calculé l'énergie transférée par impact pour la comparer avec la puissance électrique/ mécanique consommée et avec celle déterminée expérimentalement. Malgré l'approche expérimentale préconisée par les auteurs, ces derniers ne donnent pas les conditions optimales de broyage que nous allons tenter d'approfondir par nos travaux.

De leur côté, Watanabe et al. [31] ont fait une simulation cinématique, ils ont lié la trajectoire du mouvement de la bille dans le broyeur planétaire au modèle amortisseur-ressort de Kelvin. L'analyse d'une observation photographique de la trajectoire de la bille montre qu'elle dépend du sens de rotation du plateau (disque) et de la jarre.

Par la suite, Dallimore et Mc-Cormick [32] ont prédit un mouvement de broyage à deux dimensions, en utilisant la méthode d'élément discret «Discrete Element Method». Ils ont comparé les modèles viscoélastiques de Kelvin et Maxwell à un modèle élastique/ plastique afin de caractériser les collisions tangentielles et normales (radiales). De même, ils ont estimé la variation du mouvement de la bille et de l'énergie dissipée durant le choc en variant les conditions de broyage en terme de réaction lors de la synthèse du CuO/Ni [32].



## Chapitre 02: L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

---

Concernant le type de collision, Le Brun et al. [21] ont formulé lors de leurs travaux des hypothèses d'événements de collisions et leurs efficacités en variant le paramètre cinématique ( $R_{\text{critique}}$  : distance entre le centre du plateau à celui de la jarre) sans toutefois donner leurs importances sur le mécanisme de broyage.

En conclusion des travaux ci-dessus [20-21], nous remarquons que la plus part des recherches conduites dans le domaine de la dynamique du broyeur planétaire, ont porté soit sur :

- Le rôle de la puissance totale d'impact  $P_t$  ;
- La prédilection de la trajectoire du mouvement de la bille dans la jarre.

A notre avis, un examen plus approfondi est nécessaire afin de déterminer les conditions favorables d'un broyage mécanique en termes :

- De paramètres de broyage ;
- L'influence de l'impact des billes sur la paroi de la jarre.

Dans notre étude, nous présentons dans un premier lieu une analyse cinématique dans un plan cartésien en fonction de la rotation de la jarre et du plateau. Deuxièmement, nous présentons le rôle des paramètres de broyage dans la détermination du critère de décollage de la bille.

Pour la première fois, l'effet de la composante tangentielle de la vitesse de choc à un instant d'impact a été pris comme condition pour éviter le glissement de la bille et enfin établir le critère d'impact effectif.

Dans notre étude, nous adopterons comme hypothèses :

Conditions favorables d'un broyage mécanique en termes :

- Dans notre étude, l'effet cumulatif d'impact de plusieurs billes à une seule grande bille sur la paroi de la jarre ;
- Les mouvements des billes ne sont pas supposés s'interférer entre eux, d'où l'étude de la cinématique et la dynamique d'une seule bille ;
- Pour l'estimation de l'effet d'une collision simple, on suppose que l'énergie cinétique d'impact est conservée sans prendre la poudre en collision.

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

---

Afin, de faciliter la compréhension du phénomène, nous considérons la bille qui se trouve dans la jarre comme un point matériel en mouvement avec la condition qu'elle ne glisse pas sur la paroi de la jarre. Le mouvement de cette dernière est admis comme un événement périodique.

Ainsi, nous proposons dans ce qui suit une formulation mathématique de la modélisation du broyeur planétaire.

### 2.2. Mouvement cinématique :

La présente analyse de l'opération de broyage planétaire à billes ,qui est conforme aux modèles de certains auteurs[33,24] ,laquelle considère le processus global comportant un nombre de billes dans la jarre comme équivalent pour un effet cumulatif des impacts répétitifs d'une seule bille sur la paroi de la jarre .En d'autres termes ,les billes sont supposées ne s'interfèrent pas dans leurs mouvements à l'intérieur de la jarre,et par conséquent, la cinématique et la dynamique d'une seule bille pourraient .Pour estimer l'effet d'impact individuel, de la puissance/énergie transférée par les billes au volume de la poudre piégée entre la bille et la paroi de la jarre,qui doivent être évalués correctement.Ainsi,on suppose que l'énergie cinétique d'impact est conservée entre les billes en mouvement de choc.

Selon Abdellaoui et Gaffet [33], une seule bille a été conçue comme une masse ponctuelle se déplaçant sur la paroi de la jarre sous la condition «sans glissement »

De plus,la présente analyse considère le mouvement de la bille comme un événement périodique qui commence à partir d'un point donné sur la paroi de la jarre qui engendre une force de réaction maximale sur la bille.la cinématique du mouvement de la bille, contrairement à celle présentée par les auteurs dans la réf . [24]

A été traitée ici en termes d'un référentiel global dont l'origine (O) est située au centre du disque (figure 2.1).Ici, $r_d$  et  $r_v$  sont les distances entre l'origine et la centre (C) de la jarre, ainsi que ce dernier et la bille, respectivement. La vitesse de rotation de disque, déterminée par la vitesse de rotation de la ligne OC,est  $\omega_d$  dans le sens inverse des aiguilles d'une montre(ou positif) .En accord avec le mouvement planétaire du broyeur,la vitesse de rotation de la jarre dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport à la ligne OC est  $\omega_v$ ,Ici  $P(x_0, y_0)$  est un point sur la surface de la jarre situé sur la ligne OC ,qui est pris comme point initial du mouvement de la bille .A tout instant  $t$

## Chapitre 02: L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

,les vecteurs de position  $x_1$  et  $y_1$  ( figure 2.1 ) de la bille à un instant donné (t) peuvent être exprimés comme suit :

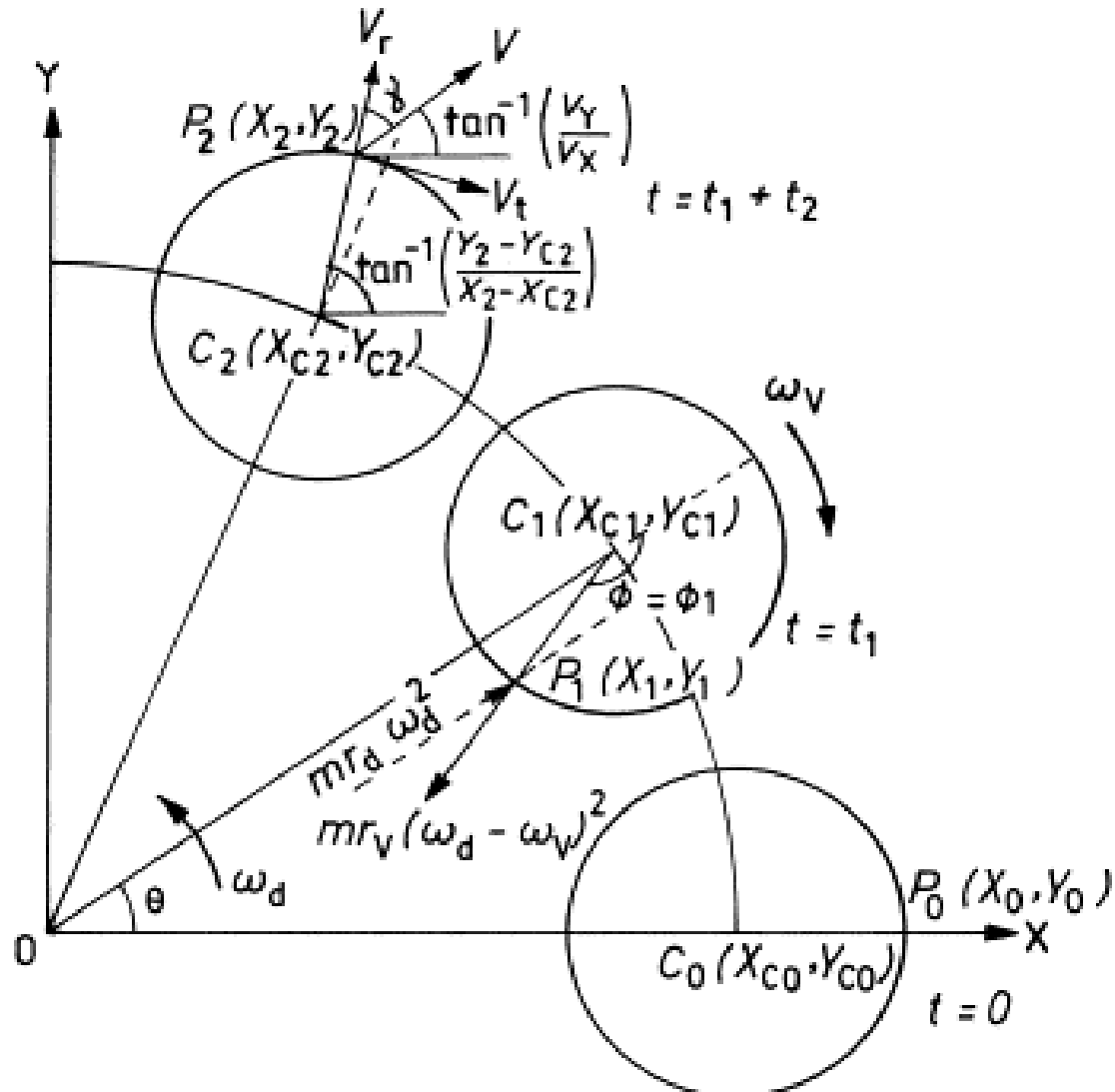


Figure 2. 1:Schéma qui montre les positions de la bille sur la surface de la jarre au point initial de son mouvement (à  $t = 0$ ), détachement (à  $t = t_1$ ) et collision (à  $t = t_1 + t_2$ ) [51].

### 2.3. Modélisation du broyeur planétaire:

Nous avons entamé dans ce paragraphe, la modélisation cinématique du plateau et de la jarre d'un broyeur planétaire type « PM400», voir figure (2.1).

Où :

$r_d$  : Rayon du disque ;

$r_v$  : Rayon de la jarre ;

$r_b$  : Rayon de la bille ;

$m$  : la masse de la bille ;

$\omega_d$ :vitesse angulaire du disque ;

$\omega_v$  : vitesse angulaire de la jarre ( $\omega_v = 2\omega_d$ ) ;

Par contre dans la figure (2.1),on représente la position d'une bille à un instant 't' matérialisée par le point 'P' .Nous donnons dans ce qui suit une description des caractéristique techniques du broyeur ,des jarres et des billes.

**Angle de rotation du plateau  $\theta$  :**

Avec :  $\theta = \omega_d t$

**Angle de rotation du plateau  $\phi$  :**

Avec :  $\phi = \omega_v t$

Les référentiels  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  et  $(C_1, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  adoptés pour le traitement mathématique sont des référentiels cartésiens avec comme :

- centre du plateau ;
- $C_1$  centre de la jarre ;
- Le rayon du plateau est pris comme étant la distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre tel que  $r_d = OC_1$  ;
- $r^* = r_v - r_b = C_1P_1$

## Chapitre 02: L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

- la vitesse de rotation des jarres est opposée à celle du plateau.

Pour faire les calculs, l'expression des coordonnées de la bille dans une base cylindrique est parfois souhaitable. Les vecteurs utilisés pour la recherche des coordonnées cylindriques forment des bases orthonormées directes tel que :

$$\vec{U}_R // \vec{r}_d \quad \text{et} \quad \vec{U}_\theta \perp \vec{U}_R, \quad \vec{u}_r // \vec{r}_v \quad \text{et} \quad \vec{u}_\phi \perp \vec{u}_r$$

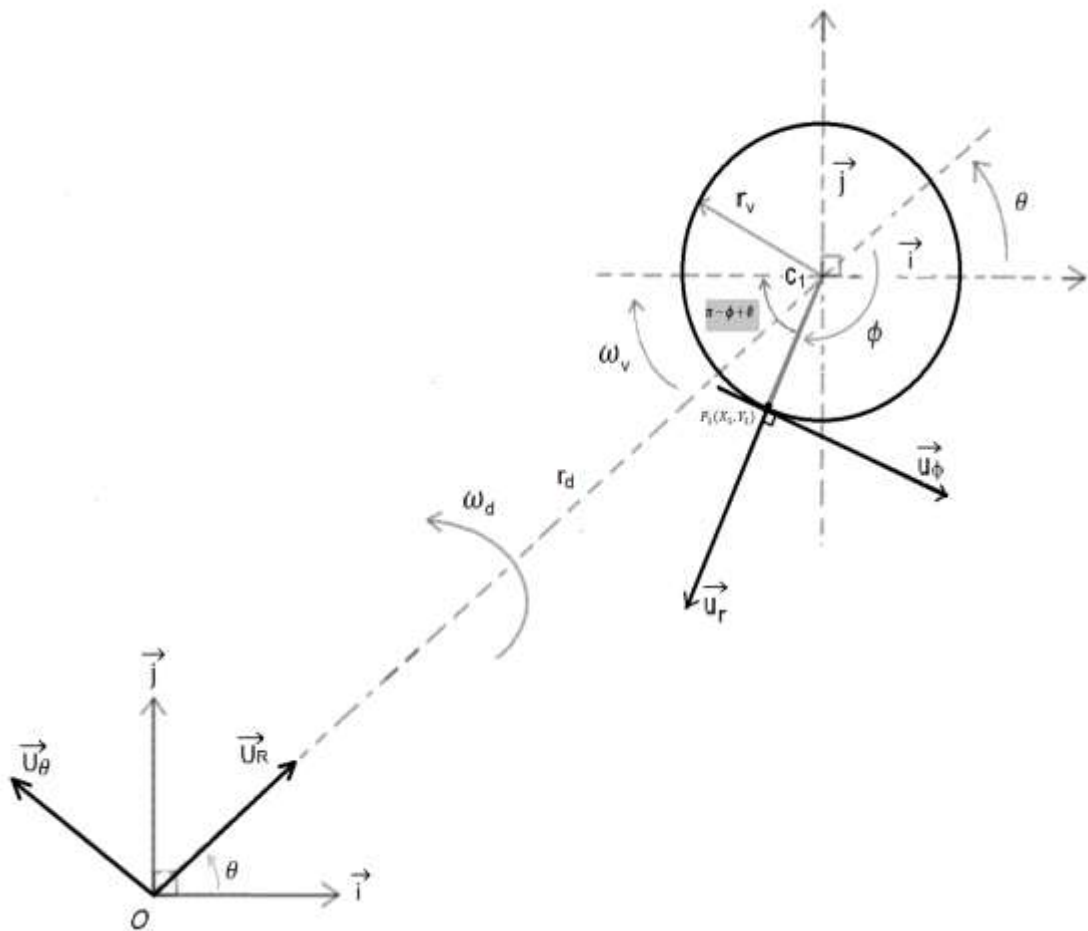


Figure 2. 2: Géométrie du plateau et de la jarre [51].

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

Ainsi, d'après la figure (2.2), la position vectorielle de la bille à un instant 't' peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OP_1} &= \overrightarrow{OC_1} + \overrightarrow{C_1P_1} = r_d \overrightarrow{U_R} + r^* \overrightarrow{u_r} \\ &= [r_d \cos \theta - r^* \cos(\pi + (\theta - \phi))] \vec{i} + [r_d \sin \theta - r^* \sin(\pi + (\theta - \phi))] \vec{j}\end{aligned}\quad (2.1)$$

Avec :

$$\cos(\pi + (\theta - \phi)) = -\cos(\theta - \phi)$$

$$\sin(\pi + (\theta - \phi)) = -\sin(\theta - \phi)$$

Alors :

$$\overrightarrow{OP_1} = [r_d \cos \theta + r^* \cos(\theta - \phi)] \vec{i} + [r_d \sin \theta + r^* \sin(\theta - \phi)] \vec{j}\quad (2.2)$$

### 2.4. Vitesse absolue de la bille avant détachement :

Sa vitesse absolue  $\overrightarrow{V}_a$  sera donnée par la dérivée par rapport au temps du vecteur  $\overrightarrow{OP_1}$ , lui-même donné par l'équation (2.1) ou l'équation (2.2), et ce comme suit :

$$\overrightarrow{V}_a = \frac{dr_d}{dt} \overrightarrow{U_R} + r_d \frac{d\overrightarrow{U_R}}{dt} + \frac{dr^*}{dt} \overrightarrow{u_r} + r^* \frac{d\overrightarrow{u_r}}{dt}\quad (2.3)$$

Et comme les rayons  $r_d$  et  $r^*$ , respectivement ceux du plateau et de la jarre moins de la bille, sont des constants dans le temps, la vitesse absolue de la bille est simplifiée à l'expression ci-dessous:

$$\overrightarrow{V}_a = r_d \frac{d\overrightarrow{U_R}}{dt} + r^* \frac{d\overrightarrow{u_r}}{dt}\quad (2.4)$$

Or:

$$\overrightarrow{U_R} = \cos \theta \vec{i} + \sin \theta \vec{j}$$

$$\overrightarrow{u_r} = \cos(\theta - \phi) \vec{i} + \sin(\theta - \phi) \vec{j}$$

La nouvelle expression simplifiée de la vitesse absolue de l'équation (2.4) sera alors:

$$\overrightarrow{V}_a = r_d \frac{d\theta}{dt} (-\sin \theta \vec{i} + \cos \theta \vec{j}) + r^* \frac{d(\theta - \phi)}{dt} (-\sin(\theta - \phi) \vec{i} + \cos(\theta - \phi) \vec{j})\quad (2.5)$$

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

Avec:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_d \quad \text{et} \quad \frac{d\phi}{dt} = \omega_v$$

En remplaçant les deux expressions, la nouvelle expression de la vitesse absolue de la bille est :

$$\vec{V}_a = r_d \omega_d [-\sin \theta \vec{i} + \cos \theta \vec{j}] + r^* (\omega_d - \omega_v) [-\sin(\theta - \phi) \vec{i} + \cos(\theta - \phi) \vec{j}] \quad (2.6)$$

Et comme:

$$\vec{U}_\theta = -\sin \theta \vec{i} + \cos \theta \vec{j}$$

$$\vec{u}_\phi = -\sin(\theta - \phi) \vec{i} + \cos(\theta - \phi) \vec{j}$$

La même vitesse absolue de la bille peut être aussi exprimée en fonction des coordonnées cylindriques et dont les composantes sont illustrées dans la figure (2.2) :

$$\vec{V}_a = r_d \omega_d \vec{U}_\theta + r^* (\omega_d - \omega_v) \vec{u}_\phi \quad (2.7)$$

L'expression finale de la vitesse absolue de la bille dans le repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$

Ainsi que son amplitude sont les suivantes :

$$\vec{V}_a = [-r_d \omega_d \sin \theta - r^* (\omega_d - \omega_v) \sin(\theta - \phi)] \vec{i} + [r_d \omega_d \cos \theta + r^* (\omega_d - \omega_v) \cos(\theta - \phi)] \vec{j} \quad (2.8)$$

$$\|\vec{V}_a\| = \sqrt{(r_d \omega_d)^2 + (r^* (\omega_d - \omega_v))^2 + 2 r_d \omega_d r^* (\omega_d - \omega_v) \cos(\phi)} \quad (2.9)$$

### 2.5. Accélération absolue de la bille avant son décollage :

L'accélération absolue  $\vec{\gamma}_a$  de la bille toujours matérialisée par le même point  $P_1$ , obtenue par la dérivée de sa vitesse  $\vec{V}_a$  par rapport au temps, est la suivante:

$$\vec{\gamma}_a = \frac{d\vec{V}_a}{dt} \quad (2.10)$$

En remplaçant  $\vec{V}_a$  par sa valeur, la nouvelle expression de l'accélération sera donc la suivante :

$$\vec{\gamma}_a = \frac{d[r_d \omega_d [-\sin \theta \vec{i} + \cos \theta \vec{j}] + r^* (\omega_d - \omega_v) [-\sin(\theta - \phi) \vec{i} + \cos(\theta - \phi) \vec{j}]]}{dt} \quad (2.11)$$

## Chapitre 02: L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

Après développement et simplification, l'expression de l'accélération dans le repère cartésien est donnée par :

$$\vec{\gamma}_a = [-r_d \omega_d^2 \cos \theta - r^*(\omega_d - \omega_v)^2 \cos(\theta - \phi)]\vec{i} - [r_d \omega_d^2 \sin \theta + r^*(\omega_d - \omega_v)^2 \sin(\theta - \phi)]\vec{j} \quad (2.12)$$

L'expression (2.12) peut être aussi exprimée en fonction des vecteurs  $\vec{U}_R$  et  $\vec{u}_r$ , donnant ainsi une meilleure représentation de l'accélération absolue de la bille, on obtient alors :

$$\vec{\gamma}_a = -r_d \omega_d^2 [\cos \theta \vec{i} + \sin \theta \vec{j}] - r^*(\omega_d - \omega_v)^2 [\cos(\theta - \phi) \vec{i} + \sin(\theta - \phi) \vec{j}] \quad (2.13)$$

$$\vec{\gamma}_a = -r_d \omega_d^2 \vec{U}_R - r^*(\omega_d - \omega_v)^2 \vec{u}_r \quad (2.14)$$

Concernant l'amplitude de l'accélération absolue, elle est donnée par l'expression (2.15) :

$$\|\vec{\gamma}_a\| = \sqrt{(r_d \omega_d^2)^2 + (r^*(\omega_d - \omega_v)^2)^2 + 2r_d \omega_d^2 r^*(\omega_d - \omega_v)^2 \cos(\phi)} \quad (2.15)$$

Pour une meilleure compréhension, l'expression 2.14 est illustrée sur la figure (2.3).

### 2.6. Critère de détachement de la bille :

#### 2.6.1 Dans un repère fixe :

D'après le principe fondamental de la dynamique, la somme des forces extérieures appliquées à la bille, est égale au moins de produit de son accélération absolue par sa masse.

Les forces physiques extérieures appliquées à la bille sont :

- Son poids (action de la pesanteur) ;
- La force centrifuge de la jarre (principe de l'action réaction).
- La force centrifuge du disque (principe de l'action - réaction).

Le poids de la bille est négligeable devant la réaction de la jarre et du disque . De plus, les deux effets n'agissent pas suivant la même direction. La résolution de la force centrifuge provenant de la rotation de la jarre et du disque le long de la direction



## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

---

$P_0C_0$  dans la figure (2.1) donne la réaction (N) agissant sur la bille à une position donnée sur la paroi de la jarre comme :

$$\vec{N} = -m \vec{\gamma}_a \quad (2.16)$$

### 2.6.2. Dans un repère lié à la bille :

Dans un référentiel fixé par rapport à la bille, cette dernière sera considérée comme fixe. Ainsi, elle doit être soumise à deux forces opposées :

- $\vec{N}$  la résultante de la force centrifuge provenant de la réaction de la jarre et du disque .
- $\vec{F}$  tel que la somme vectorielle des  $\vec{N}$  et  $\vec{F}$  est égale à un vecteur nul.

la force  $\vec{N}$  a un sens opposé à celui de l'accélération ( $\vec{N} = -m\vec{\gamma}_a$ ). En d'autres termes, elle est dirigée vers l'extérieur et non pas vers le centre de la jarre. D'où la notion de force centrifuge qui tend à coller la bille contre la paroi de la jarre.

Résolution de la force centrifuge provenant de la rotation de la jarre et du disque le long de la direction  $P_1C_0$  dans la figure 2.1 donne la réaction  $\vec{N}$  agissant sur la bille à une position donnée sur la paroi de jarre comme :

$$\vec{N} + m\vec{\gamma}_a = \vec{0} \quad (2.17)$$

La résolution de l'équation (2.17) peut être facilement faite en exprimant l'accélération absolue de la bille et la réaction de la jarre en fonction de leurs coordonnées cylindriques dans la base vectorielle  $(\vec{U}_R, \vec{u}_r)$  liée à la jarre.

### 2.6.3. Accélération absolue et la réaction de la jarre dans la base vectorielle

$(\vec{U}_R, \vec{u}_r)$  :

D'après l'équation (2.14) ,l'accélération absolue  $\vec{\gamma}_a$  peut être décomposée en deux composantes  $\vec{\gamma}_1$  et  $\vec{\gamma}_2$  tel que :

$$\vec{\gamma}_1 = -r_d \omega_d^2 \vec{U}_R \quad (2.18.a)$$

$$\vec{\gamma}_2 = -r^*(\omega_d - \omega_v)^2 \vec{u}_r \quad (2.18.b)$$

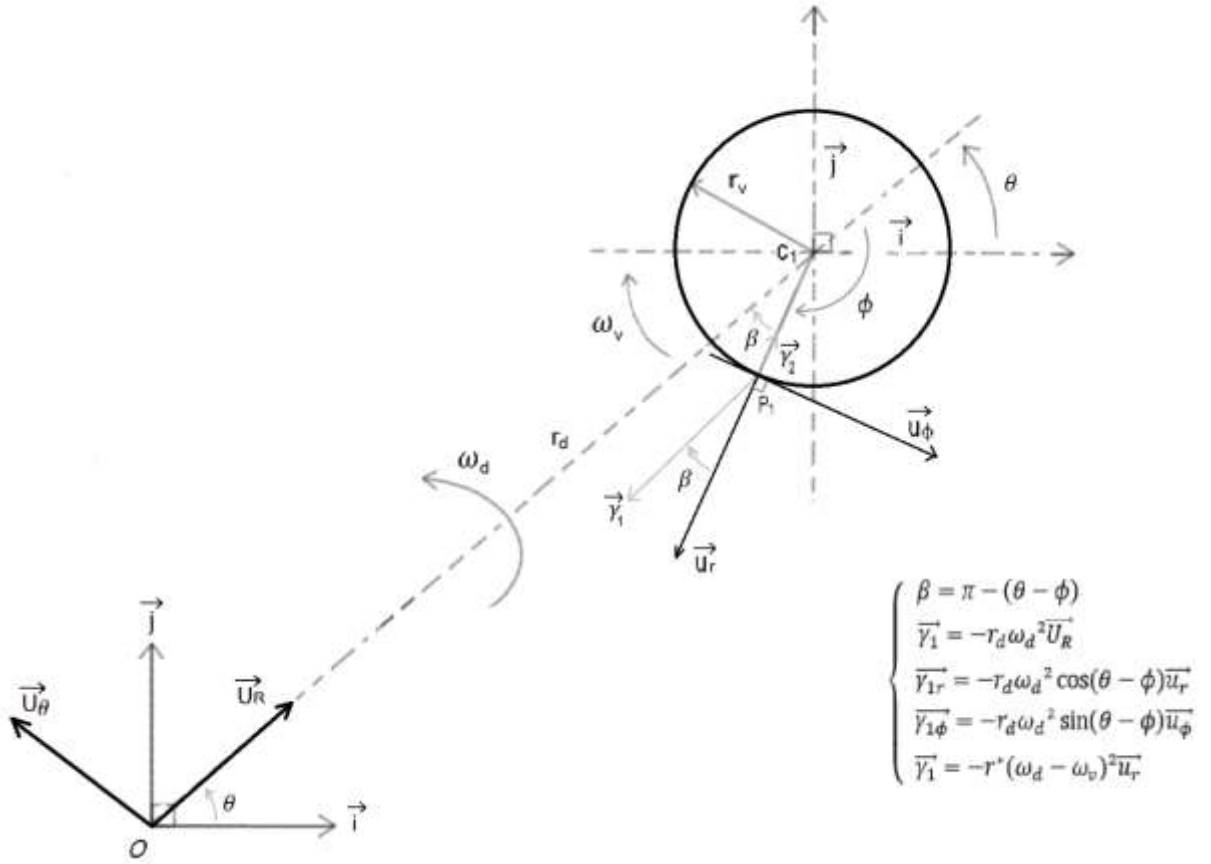


Figure 2. 3: décomposition de l'accélération absolue ( $\gamma_a$ ) de la bille avant l'instant de décollage dans la base  $((UR)$ ,  $(ur)$ ) [51].

D'après la figure 2.3, nous remarquons que la composante  $\bar{\gamma}_1$  peut être décomposée dans la base  $(\bar{u}_r, \bar{u}_\phi)$  en deux composant  $\bar{\gamma}_{1r}$  et  $\bar{\gamma}_{1\phi}$  tel que:

$$\bar{\gamma}_{1r} = r_d \omega_d^2 \cos(\pi - \phi) \bar{u}_r = -r_d \omega_d^2 \cos(\phi) \bar{u}_r \quad (2.19.a)$$

$$\bar{\gamma}_{1\phi} = -r_d \omega_d^2 \sin(\pi - \phi) \bar{u}_\phi = -r_d \omega_d^2 \sin(\phi) \bar{u}_\phi \quad (2.19.b)$$

Ainsi, l'expression finale de composante  $\bar{\gamma}_a$  dans la base  $(\bar{u}_r, \bar{u}_\phi)$  sera donc :

$$\bar{\gamma}_a = -r_d \omega_d^2 \cos(\phi) \bar{u}_r - r_d \omega_d^2 \sin(\phi) \bar{u}_\phi - r^* (\omega_d - \omega_v)^2 \bar{u}_r \quad (2.20)$$

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

On obtient alors l'expression de l'accélération absolue dans la base  $(\vec{u}_r, \vec{u}_\phi)$  :

$$\vec{\gamma}_a = [-r_d \omega_d^2 \cos(\phi) - r^*(\omega_d - \omega_v)^2] \vec{u}_r - r_d \omega_d^2 \sin(\phi) \vec{u}_\phi \quad (2.21)$$

La résolution de la force centrifuge provenant de la rotation de la jarre et du disque donne la réaction (N) agissant sur la bille à une position donnée sur la paroi de la jarre peut être décomposée dans la base  $(\vec{u}_r, \vec{u}_\phi)$  :

$$\vec{N} = \vec{N}_r + \vec{N}_\phi \quad (2.22)$$

En tenant compte de la décomposition de l'accélération absolue et de la réaction de la jarre dans la base  $(\vec{u}_r, \vec{u}_\phi)$ , l'équation (2.17) peut être écrite sous la forme d'un système de deux équation de la façon suivant :

$$\vec{N}_r + m [-r_d \omega_d^2 \cos(\phi) - r^*(\omega_d - \omega_v)^2] \vec{u}_r = \vec{0} \quad (2.22.a)$$

$$\vec{N}_\phi + m [-r_d \omega_d^2 \sin(\phi)] \vec{u}_\phi = \vec{0} \quad (2.22.b)$$

Au point de détachement c-à-d lorsque  $\phi = \phi_1$ , la composant radiale de la réaction résultante sur la bille est réduite à zéro, c-à-d  $\vec{N}_r = 0$ , l'équation (2.22.a) du système précédent devient devient alors :

$$\vec{N}_r = m [r_d \omega_d^2 \cos(\phi) + r^*(\omega_d - \omega_v)^2] \vec{u}_r = \vec{0} \quad (2.23)$$

En simplifiant l'équation (2.23), on obtient l'expression suivant:

$$\cos \phi = -\frac{r^*(\omega_d - \omega_v)^2}{r_d \omega_d^2} \quad (2.24)$$

La bille reste en contact avec la paroi de la jarre tant que  $\vec{N}_r$  est positive .cette condition conduit (à partir de l'équation (2.24)) :

$$\cos \phi \geq -\frac{r^*(\omega_d - \omega_v)^2}{r_d \omega_d^2} \quad (2.25)$$

Il est à noter qu'une expression identique a été obtenue par cortine auteurs [24]. Cependant, la valeur limite  $\cos \phi_1 (\geq -1)$  exprimée par l'équation (2.24),est employée ici pour définir un paramètre de détachement (**S**) donné par :

$$S = \frac{r^*(\omega_d - \omega_v)^2}{r_d \omega_d^2} \quad (2.26)$$

Puisque S doit être majoré entre les valeurs limites ,  $0 \leq S \leq 1$  ,on peut introduire et faire la combinaison des valeurs  $\omega_d$  et  $\omega_v$  pour un broyeur donné (valeurs

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

connues de  $r_d$  et  $r_v$  et  $r_b$ ) tels que la bille est détachée de la paroi interne de la jarre d'un point donné pour faire un impact dans un autre point sur la paroi de la jarre, vu que la condition exprimée par l'équation (2.24) au point de détachement :

$$\cos \phi_1 = -S \quad (2.27)$$

$$\phi_1 = \arccos(-S) \quad (2.28)$$

### 2.6.4.vitesse de détachement et accélération de détachement de la bille:

Pour avoir l'amplitude de la vitesse absolue de la bille au moment du décolage, il suffit de remplacer  $\cos(\phi)$  par sa valeur donnée par l'équation (2.24) dans l'équation (2.9). on obtient ainsi l'expression de l'amplitude de la vitesse absolue de la bille avant l'instant de décolage .

$$\|\vec{V}_a\| = \sqrt{(r_d \omega_d)^2 + (r^*(\omega_d - \omega_v))^2 \left[1 - 2 \frac{(\omega_d - \omega_v)}{\omega_d}\right]} \quad (2.29)$$

De même, pour avoir l'amplitude de l'accélération absolue de la bille au moment de détachement, il suffit de remplacer  $\cos(\phi)$  par sa valeur donnée par l'équation (2.24) dans l'équation (2.15) sera alors la suivante :

$$\|\vec{\gamma}_a\| = \sqrt{(r_d \omega_d^2)^2 - (r^*(\omega_d - \omega_v)^2)^2} \quad (2.30)$$

Selon (la figure 2.1), l'intervalle entre la bille se déplaçant des positions  $P_0(X_0, Y_0)$  à  $P_1(X_1, Y_1)$  sur la surface de la jarre peut être obtenu par  $t_1 = \frac{\phi_1}{\omega_v}$ . dans le même intervalle, si  $\theta_1$  est le déplacement angulaire de la ligne OC, alors  $\theta_1 = \omega_d \frac{\phi_1}{\omega_v}$ . Au moment du détachement, la position de la bille  $P_1(X_1, Y_1)$  est un point sur la surface de la jarre avec son centre situé à  $(X_{c1}, Y_{c1})$ . Par conséquent,

$$(x_1 - x_{c1})^2 + (y_1 - y_{c1})^2 = r^{*2} \quad (2.31)$$

Où:

$$x_1 = [r_d \cos \theta + r^* \cos(\theta - \phi)] \quad (2.32. a)$$

$$x_{c1} = r_d \cos \theta_1 \quad (2.32. b)$$

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

---

Et :

$$y_1 = [r_d \sin \theta + r^* \sin(\theta - \phi)] \quad (2.33. a)$$

$$y_{c1} = r_d \sin \theta_1 \quad (2.33. b)$$

### 2.7.Cinématique d'impact :

Après l'événement de détachement, la bille continue à se déplacer sur une trajectoire donnée et sa position aux étapes de temps successives est calculée à partir des composantes de la vitesse dans la direction des axes de coordonnées au moment de détachement .le mouvement non accéléré de la bille est continue pour un intervalle  $t_2$  jusqu'à ce qu'elle heurte la surface de la jarre (figure 2.1).

L'étape de temps est limitée tels que la distance de centre de la bille jusqu'à la paroi de la jarre à l'étape finale  $\Delta r_v$  devrait être moins que le rayon de la bille .la position de choc sur la surface de la jarre ,  $\vec{P}_2 (\vec{X}_2 , \vec{Y}_2 )$  est donné par :

$$\vec{OP}_2 = x_2 \vec{i} + y_2 \vec{j} = \vec{OP}_1 + \vec{v}_d t_2 \quad (2.34)$$

$$x_2 = x_1 + v_x t_2 \quad (2.35.a)$$

Et:

$$y_2 = y_1 + v_y t_2 \quad (2.35.b)$$

Avec:

$$v_x = \frac{dx_1}{dt} = -\omega_d r_d \sin \theta - (\omega_d - \omega_v) r^* \sin(\theta - \phi) \quad (2.36.a)$$

Et,

$$v_y = \frac{dy_1}{dt} = \omega_d r_d \cos \theta + (\omega_d - \omega_v) r^* \cos(\theta - \phi) \quad (2.36.b)$$

En considérant la position de la bille au point de détachement, et la collision suivant en termes de la position respective du centre de la jarre :

$$(x_1 + v_x t_2 - x_{c2})^2 + (y_1 + v_y t_2 - y_{c2})^2 = (x_1 - x_{c1})^2 + (y_1 - y_{c1})^2 \quad (2.37)$$

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

Ou  $x_{c2}$  et  $y_{c2}$  sont les coordonnées de la position du centre de la jarre à l'instant d'impact (figure 2.1).

L'Équation (2.37) peut être changée en une équation non linéaire avec un paramètre inconnu  $t_2$ , soit :

$$(v_x^2 + v_y^2)t^2 + 2(x_1v_x + y_1v_y) - 2[x_1rd \cos(\phi_1 + \omega dt) + y_1rd \sin(\phi_1 + \omega dt)] - 2[v_x rd \cos(\phi_1 + \omega dt) + v_y rd \sin(\phi_1 + \omega dt)] t + 2(x_1x_{c1} + y_1y_{c1}) = 0 \quad (2.38)$$

Il est intéressant de noter ici que seulement à la bille reste fixée à la paroi de la jarre de l'équation (2.38) est vérifiée. À tout autre point sur la trajectoire de la bille durant le choc, le côté à gauche de l'équation (2.38) donne une valeur négative, indiquant que la bille ne reste pas fixée dans la jarre. Dans le cas d'un événement de choc, la résultante de la vitesse ( $v$ ) de choc de la bille est obtenue à partir de l'équation (2.38) comme :

$$v^2 = (r_d \omega_d)^2 + (r^*(\omega_d - \omega_v))^2 + 2r_d \omega_d r^*(\omega_d - \omega_v) \cos(\phi_1) = v_r^2 + v_t^2 \quad (2.39)$$

Où  $v_r$  et  $v_t$ , respectivement, sont les composantes radiale et tangentielle de la vitesse de choc, et de l'angle d'incidence ( $\gamma$ ) dans la figure 2.1 qui est exprimé par :

$$\gamma = \arctan\left(\frac{v_t}{v_r}\right) = \arctan\left(\frac{y_2 - y_{c2}}{x_2 - x_{c2}}\right) - \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (2.40)$$

### 2.8. Réinitialisation du mouvement de la bille:

Après le choc, la bille doit se déplacer en un point situé sur la surface de la jarre sur la ligne OC pour lancer le cycle suivant.

Le temps de déplacement ( $t_3$ ) pour ce mouvement est donné par :

$$t_3 = \frac{\alpha}{\omega_v} \quad (2.41)$$

Où:  $\alpha = 2\pi - (\phi_1 + \omega_v t_2)$

### 2.9. fréquence d'impact:

Le temps total pour un cycle complet du mouvement de la bille est déterminé par, le temps de la bille en contact avec la paroi de la jarre ( $t_1$ ), l'intervalle de temps entre le détachement et le contact suivant de la bille avec la paroi de la jarre ( $t_2$ ) et le temps mis entre la collision de la bille et sa position initiale dans la jarre pour un

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

prochain cycle de mouvement ( $t_3$ ), la période de temps pour un cycle complet est donnée par :

$$t_f = t_1 + t_2 + t_3 \quad (2.42)$$

D'où, la fréquence de choc est :

$$f = \frac{1}{t_f} \quad (2.43)$$

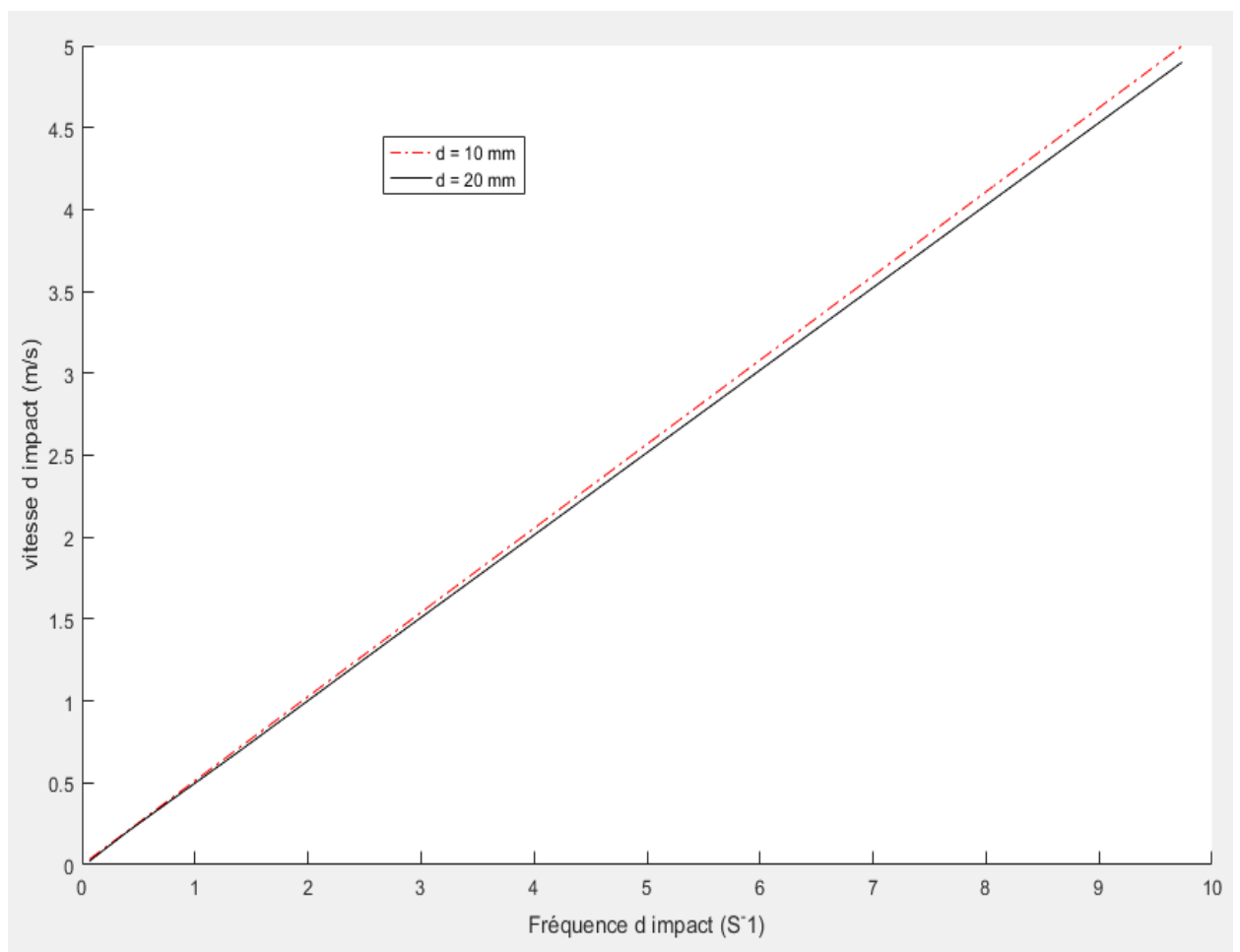


Figure 2. 4: la vitesse de choc de la bille pour un tour de rotation du plateau en fonction de la fréquence d'impact et pour diamètres de billes :  $d=10$  mm et  $d=20$  mm.

## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

---

### 2.10.Dynamique de la taille d'impact :

On considère que la bille dont la vitesse ne varie pas pendant le vol, l'énergie cinétique de la bille ( $E_t$ ) en fonction de la masse ( $m$ ) lors de l'événement de choc est exprimée par :

$$E_t = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.44)$$

Ainsi, la puissance totale ( $P_t$ ) transmise par la bille et par impact est exprimé par :

$$P_t = f E_t \quad (2.45)$$

Selon certaines études menées [34,35] , qui considèrent que la collision de la bille-paroi jarre ait lieu sous la condition hertzienne d'impact [36] , et dans la présente analyse, cette condition a été également adoptée. On considère une surface circulaire d'impact, la composante radiale de la force d'impact, selon la théorie hertzienne d'impact [36],peut être obtenue par l'équation suivante :

$$F_r = \left(\frac{4}{3}\right) r_b^{1/2} \left(\frac{Y}{1-\nu^2}\right) \delta_r^{3/2} \quad (2.46)$$

Où :  $r_b$  est le rayon de la bille,  $\delta$  est la distance d'approche de la bille à travers la surface de la jarre,  $Y$  le module d'élasticité,  $\nu$  est le coefficient de Poisson. D'où, la pression normale ( $P_n$ )est obtenue par :

$$P_n = \frac{F_r}{\pi a^2} \quad (2.47)$$

Où,  $a$  est le rayon de la surface d'impact circulaire obtenue à partir de réf. [36]. Si la déformation de la bille est prise à être réversible de nature, la durée d'impact ( $t_i$ ) peut être obtenue à partir de réf. [36] comm :

$$t_i = 2.94 \frac{\delta_r}{v_r} \quad (2.48)$$

Par conséquent, en tenant compte de l'aspect réversible d'impact, le temps de compression peut être obtenu par :

$$t_c = t_i/2 \quad (2.48. a)$$



## Chapitre 02:L'étude Cinématique du Broyeur Mécanique type Planétaire

---

Dans l'analyse présente, la masse et le rayon de courbure de la jarre sont considérés infini relativement à ceux de la bille. Ainsi, une modification appropriée de l'expression pour moment linéaire dans la direction tangentielle donne [36] :

$$F_t = m \frac{d}{dt} (v_t + \omega_t r_b) \quad (2.49)$$

Où,  $F_t$  est la composante tangentielle de la force d'impact,  $v_t$  la composante tangentielle de la vitesse au point d'impact, et  $\omega_r$  la vitesse angulaire relative. Une modification identique pour la conservation de la quantité du mouvement [36] de la bille par rapport à l'axe normal au plan de mouvement passant par le point d'impact, ce qui donne:

$$F_t = \frac{d}{dt} [m v_t r_b + m (r_b^2 + r_g^2) \omega_r] \quad (2.50)$$

Ici,  $r_g$  est le rayon de giration de la bille par rapport au centre de la masse. En éliminant  $\omega$  à partir des équations (2.49) et (2.50),  $F_t$  peut être obtenue comme suit :

$$F_t = - \frac{m}{(1+r_b^2/r_g^2)} \left( \frac{dv_t}{dt_i} \right) \quad (2.51)$$

Considérons  $F_t$  comme une variable dans l'intervalle  $t_c$  pour réduire la vitesse tangentielle à zéro, l'équation (2.51) donne :

$$\int_0^{t_c} dt_i = -(F_t) \frac{m}{(1+r_b^2/r_g^2)} \int_{v_t}^0 dv \quad (2.52)$$

Par conséquent,  $F_t$  peut être obtenue en intégrant l'équation (2.52), donnée par:

$$F_t = \frac{m}{(1+r_b^2/r_g^2)} \left( \frac{v_t}{t_c} \right) \quad (2.53)$$

# **CHAPITRE 03:**

## **La température en mecanosynthèse dans le broyeur planétaire**

### 3.1. Introduction :

Le broyage mécanique à haute énergie également appelé mécanosynthèse a été développé dans les années 60, par John Benjamin [37 ,38] pour réaliser des dispersions d'oxydes ( $Al_2O_3, Y_2O_3$ ) dans des alliages de nickel dans le but de renforcer leurs propriétés mécaniques. Le broyage mécanique à haute énergie est un procédé en général à sec, de mélange de poudres d'éléments purs ou alliés dans un broyeur à haute énergie. C'est aussi une méthode puissante, capable de réaliser des mélanges à l'échelle atomique. Elle a un potentiel d'application assez vaste. Elle permet d'obtenir des structures uniques avec des coûts d'élaboration peu élevés. C'est pourquoi elle a connu un véritable essor dans les années 1980 et 1990.

Le broyage mécanique consiste à agiter une jarre contenant des billes d'acier et de la poudre. Cette poudre peut être un mélange de poudres d'éléments purs ou de poudres d'éléments pré-alliés. Sous l'effet des collisions répétées des billes entre elles, mais aussi des billes avec la paroi de la jarre, les grains de poudres sont écrasés (Figure 3.1). Ils sont alors alternativement déformés plastiquement, fracturés et soudés ce qui conduit à la formation d'agrégats, ou de particules, dont la taille dépend de la compétition entre les phénomènes de soudure et de fracture. Lors du broyage à haut-énergie, des transformations de phases peuvent se produire [39], cette transformation provient en général des chocs mécaniques intervenant lors du broyage.

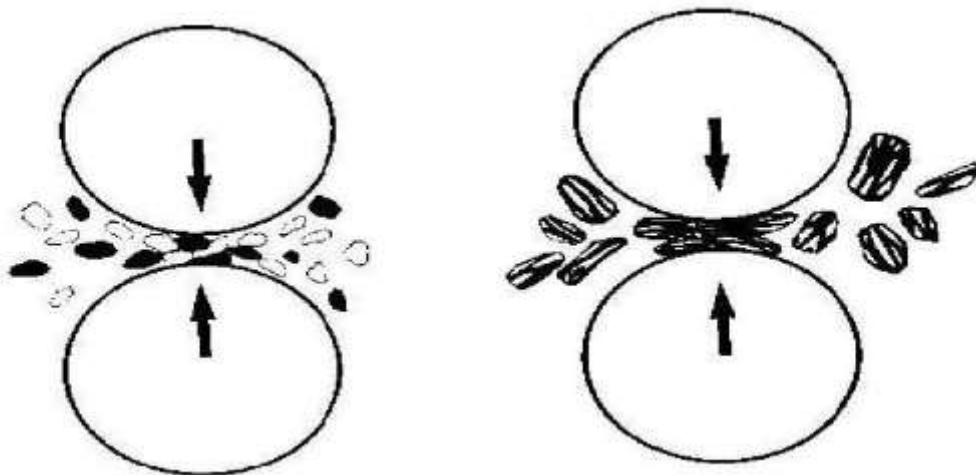


Figure 3. 1: Schéma de la dynamique, fragmentation et de ressoudage des poudres lors du broyage[16].

### 3.2. Mécanosynthèse (Broyage à haute énergie) :

Parmi les techniques d'élaboration des matériaux nanostructurés, la technique dite de mécanosynthèse consiste généralement à broyer des poudres micrométriques de métal pur, intermétallique, alliages de composition stoechiométrique pour obtenir un matériau nanostructuré qui n'est pas nécessairement homogène. Elle permet l'obtention de nanoprécipités ou nano-objets dispersés de façon homogène au sein de la matrice. Ce chapitre décrit, la définition de la mécanosynthèse, leur principe et les différents paramètres mis en jeu au cours d'un broyage à haute-énergie.

### 3.3. Les étapes de la mécanosynthèse:

Le broyage mécanique haute énergie est, principalement, une technique de déformation des matériaux. Dans la préparation de ces matériaux, on introduit la poudre dans une ou deux jarres avec des billes qui serviront au transfert d'énergie. Une fois scellé et maintenu en place dans un système mécanique capable de conférer aux jarres un mouvement selon les trois directions de l'espace, le système est mis en marche pour des périodes de temps variables. Le déplacement des jarres, selon chacune des directions de l'espace, va donner aux billes une énergie qui, lors des collisions, sera absorbée par la poudre. Le mouvement de rotation du plateau et de la jarre, d'une façon opposé, induit des chocs répétés entre les billes-billes et billes-paroi de la jarre, à cette effet, les poudres sont piégées et écrasées entre billebille ou entre bille-paroi de la jarre, et lors du broyage les particules de la poudre sont respectivement aplaties, soudées, fracturées et ressoudées entre elles, donc les poudres sont soumises à une déformation plastique, et l'action combinée du soudage et de cisaillement et de l'élévation locale de la température à l'intérieure de la jarre augmente la mobilité atomique et la création des défauts atomiques, qui facilite la diffusion et induit des transformation de phases. On peut résumer le processus de la mécanosynthèse en cinq étapes (Figure 3.2):

- *période initiale*

Formation de couches d'enrobage des billes et formation de particules plus grosses et de particules plus fines que les particules de la poudre de départ.

- ***Période dominée par le soudage des particules***

Augmentation significative de la fraction des grosses particules (plaquettes) qui sont constituées de lamelles alternées des éléments de départ. Les particules les plus fines, dont la fraction ne change pas, sont en majorité des paillettes constituées par les éléments de départ non combinés.

- ***Période de formation de particules équiaxes***

Les particules les plus grosses évoluent vers des dimensions plus équiaxes et les particules constituées par les éléments de départ non combinés disparaissent en grande partie.

- ***Période de convolution aléatoire des lamelles***

Les lamelles qui plutôt linéaires au cours des étapes précédents s'entremêlent et prennent des formes plus sinueuses qui sont dues au soudage de particules équiaxes. La dureté augmente et la fraction des particules les plus grosses diminue.

- ***Période de synthèse en régime stationnaire***

L'homogénéité interne des particules augmente quelle que soit la taille de ces dernières et la distribution de taille des particules reste stationnaire.

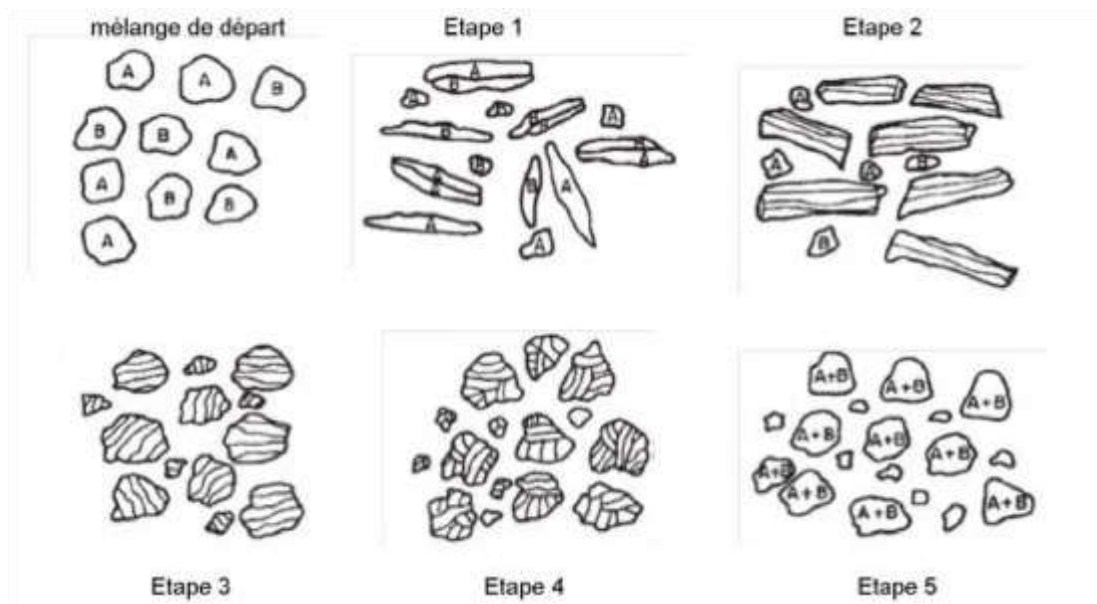


Figure 3. 2: les cinq étapes de l'évolution de la poudre durant la mécanosynthèse.

### 3.4. Paramètres de broyage :

Le broyage mécanique haute énergie est un processus qui met en jeu un grand nombre de paramètres qui ne sont pas encore maîtrisés et ont un effet considérable sur la nature du produit final. Parmi ces paramètres: nature des poudres, le type de broyeur, le rapport masse billes/masse poudre, l'atmosphère, le temps de broyage, etc.

#### 3.4.1. Nature des poudres:

On distingue les mélanges des poudres ductile-ductile, ductile-fragile et fragile-fragile:

- Pour un mélange ductile-ductile, les particules de poudres sont aplaties, au début du broyage, par un processus de micro-forgeage. Les plaquettes des particules sont soudées ensemble et forment une structure lamellaire. Au fur et à mesure que le temps de broyage augmente, les distances de diffusion diminuent et la densité de défauts augmente. Pour des temps de broyages plus long, un vrai alliage se forme à l'échelle atomique.
- Dans le cas d'un mélange ductile-fragile, les particules ductiles sont aplaties et les particules fragiles sont fragmentées et incorporées dans la matrice

ductile. Pour des temps de broyage long, il y a formation d'une structure lamellaire constituée de particules dans les quelles les fragments fragiles sont distribués de façon uniforme s'ils sont insolubles.

Dans le cas contraire, un mélange est formé entre les deux composés et une homogénéité chimique est réalisée.

- Pour un mélange fragile-fragile, les particules fragiles sont fragmentées et leur taille diminue en fonction du temps de broyage. Quand la taille des particules atteint une valeur critique, les particules les plus fragiles sont fragmentées et encastrées dans les particules.

### 3.4.2. Types de broyeurs:

Les différents types de broyeurs utilisés dans les laboratoires de recherche sont les broyeurs planétaires (différente Pulverisette), attriteur et vibratoire (Spex 8000). Chaque broyeur se caractérise par son mode d'emploi, son énergie et sa capacité.

### 3.4.3. Le rapport masse billes/masse poudre :

Le rapport massique influence à la formation des phases dans les poudres broyées. Il peut varier de 1/1 jusqu'à 220/1. Avec l'augmentation de ce rapport, il est possible de réduire le temps nécessaire pour obtenir le produit final [40,41]. Ainsi, plus le rapport est grand, plus le nombre de collisions par unité de temps, qui entraîne une augmentation de la température locale, est grand et par conséquent, le processus de broyage serait plus rapide. Le transfert d'énergie à la poudre est fonction du nombre et du diamètre des billes.

#### 3.4.4. L'atmosphère de broyage:

L'atmosphère peut influencer la nature du produit final et sa taille. En général, des gaz inertes (Ar, He) sont utilisés pour éviter la contamination, mais aussi l'air, l'azote, N<sub>2</sub>, ou l'hydrogène, H<sub>2</sub>, pour produire des oxydes, des nitrures et des hydrures. Les gaz inertes peuvent créer des défauts et être «emprisonnés» dans le composé final [42]. Selon la nature de l'atmosphère, le broyage peut être réalisé en environnement sec (air, Ar, He, N<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>) ou humide (des composés organiques peuvent être introduits, par exemple, dans l'atmosphère de gaz inerte).

#### 3.4.5. Broyage continu – séquentiel :

Le broyage continu peut conduire à un produit différent de celui obtenu par un broyage séquentiel (avec des pauses).

#### 3.4.6. La température de broyage :

La température a une influence sur le processus de formation du produit final. Une température élevée favorise l'augmentation de la taille des cristallites mais réduit leurs contraintes et la solubilité à l'état solide [40,41]. Il existe une différence entre la température des billes et celle de la paroi de la jarre ainsi que pour les poudres ductiles et fragiles [43], la température dépend essentiellement du type de broyeur et des paramètres de broyage .

#### 3.4.7. Contamination de la poudre :

La contamination est l'un des inconvénients de la mécanosynthèse. Elle provient essentiellement des outils de broyage, de l'atmosphère, du temps et de l'intensité de broyage et des propriétés de la poudre broyée. La contamination par les outils de broyage peut être réduite en utilisant des jarres et des billes de même nature à celle des mélanges à broyer. Par ailleurs, la haute réactivité des surfaces fraîches créées lors du broyage rend la poudre très sensible à la contamination par l'oxygène et l'azote. La présence de ces gaz, combinée à l'élévation de la température peut entraîner des réactions d'oxydation ou de nitruration. Dans le but de réduire ces effets, les broyages sont généralement effectués sous une atmosphère d'argon ou sous vide secondaire. Toutefois, certains broyages sont réalisés sous atmosphère gazeuse (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, etc...) afin de faire réagir le matériau avec celle-ci pour former des oxydes, des nitrures ou des hydrures.



### 3.5. Principe de broyage à haut - énergie :

Le broyage mécanique est une technique d'élaboration de poudres à l'état solide. Au cours de ce processus, les grains de poudres sont piégés et écrasés entre les billes et la paroi des jarres, puis s'allongent sous l'effet de la pression (Figure 3.3). Les particules sont soumises à des déformations plastiques accompagnées d'un durcissement et d'une augmentation de l'énergie locale du système à cause de nouvelles fractures des surfaces. Ceci provoque l'augmentation locale de la température qui peut induire des transformations de phases. Les grains de poudres subissent des processus de morcellement et de soudage successifs. Pendant chaque choc, des milliers de particules participent à cette action. Ainsi, les petits grains ont tendance à augmenter leur taille par ressoudage alors que les gros grains ont une grande probabilité d'être fracturés. Cette technique permet entre autres l'obtention de solutions solides amorphes et intermétalliques [44]. Au cours du broyage à haute énergie, les poudres d'éléments ductiles A et B (Figure 3.4) subissent de très grandes déformations à des vitesses de l'ordre de  $10^3$  à  $10^4$  s<sup>-1</sup>. Les chocs répétés produisent alors une morphologie en lamelles alternées A et B, d'épaisseurs initiales de l'ordre de quelques micromètres. Cette structure de type lamellaire à 3D s'affine au cours du temps pour atteindre une longueur caractéristique de l'ordre du nanomètre.

Dans le cas du broyage des poudres métalliques, cet affinement met en jeu la création de réseaux de dislocations dans des bandes de cisaillement, suivie de leur réorganisation en joints de grains à faible puis à forte désorientation.

- Etat initial : les matériaux introduits dans le broyeur peuvent être des poudres de constituants élémentaires ou pré-alliés.
- Etats transitoires : soumis aux chocs mécaniques, une succession de fractures et de soudures conduit à la formation de lamelles alternées formées par les constituants initiaux.
- Etat stationnaire : en fin de broyage (de quelques heures à quelques centaines d'heures), la nature du produit broyé n'évolue plus tant du point de vue de la nature des phases que leur distribution spatiale (« microstructure »).

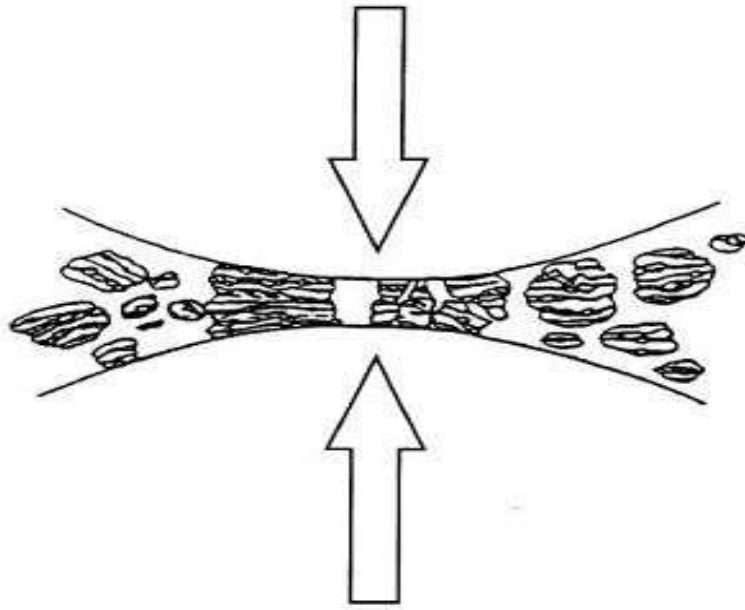


Figure 3.3: Fracture dynamique et ressoudage des poudres lors d'un choc bille-bille.

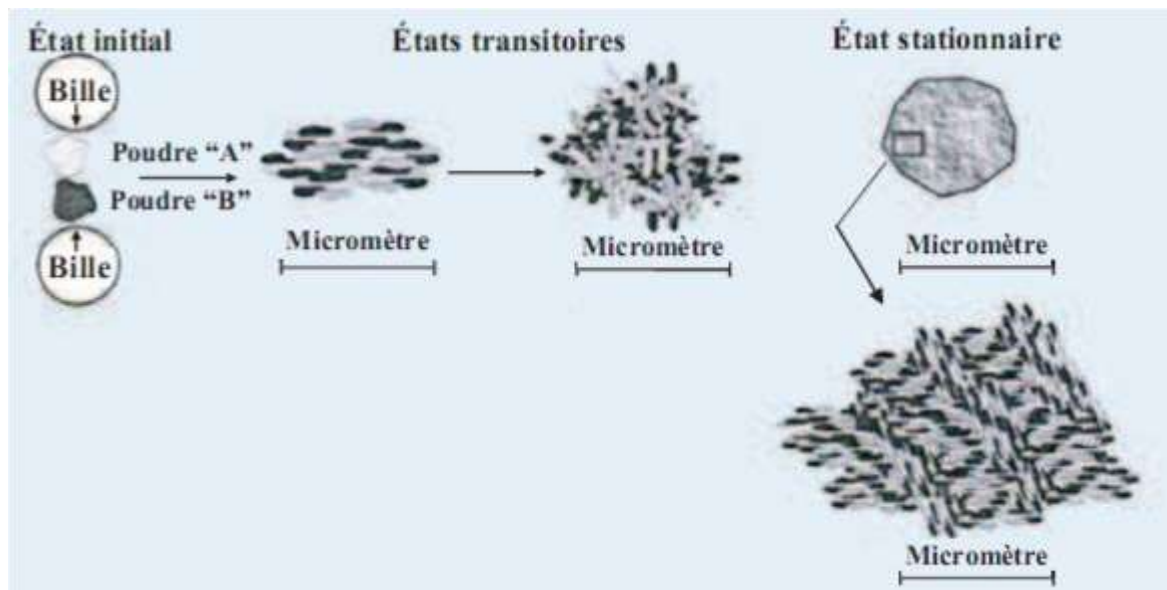


Figure 3. 4: Les différentes étapes de l'évolution de poudres élémentaires sous broyage[4].

### 3.6. Application de la Mécanosynthèse :

L'introduction d'un grand nombre de défauts cristallins, durant le broyage d'un mélange de poudres, fournit les conditions nécessaires pour qu'une réaction à l'état solide se produise. Le broyage haut-énergie d'un mélange de métaux peut générer des transformations des phases à l'état solide, des phases amorphes, nanocristallins, de solutions solides à partir d'éléments immiscibles, intermétalliques, céramiques ou nouvelles phases peuvent être provoqué.

### 3.7.Mode de Propagation de chaleur :

#### 3.7.1 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 [45].

#### 3.7.2 Convection :

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 [45].

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.

### 3.7.3 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.

### 3.8 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  $\Delta\tau$  est évalué par la théorie hertzienne des impacts élastiques [46] ;
- 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  $\Delta\tau$ .

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 (3.5) représente schématiquement la prise de la poudre compacte entre la bille et la paroi pendant la collision [47,48].

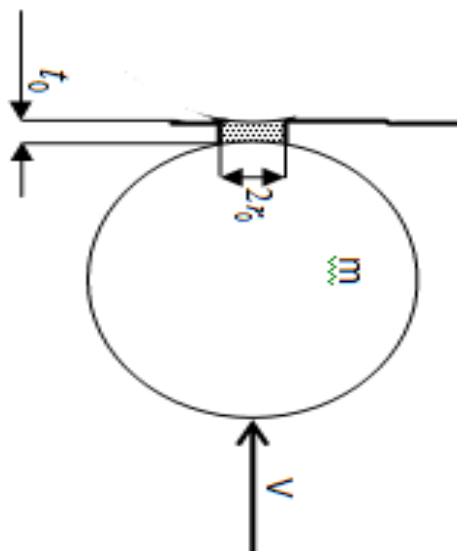


Figure 3. 5: Représentation schématique de la prise de la poudre compacte entre la bille et la paroi pendant la collision.

### Chapitre 03: La Temperature en Mécanosynthèse dans le Broyeur Planétaire

---

La même poudre compacte est représentée dans la figure (3.6), par un disque d'épaisseur  $t_0$  et de rayon  $r_0$  [49]. 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 [48] :

$$t_0 = K/\sqrt{D} \quad (3.1)$$

Avec :

$K$  : Constante.

$D=2*r_0$  : 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 [46].

L'énergie cinétique totale de chaque bille est :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (3.2)$$

Avec :

$m$  :Masse de la bille, Kg;

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

La figure (3.6) représente schématiquement une poudre compacte d'un diamètre  $D$ , et une épaisseur  $t_0$ .

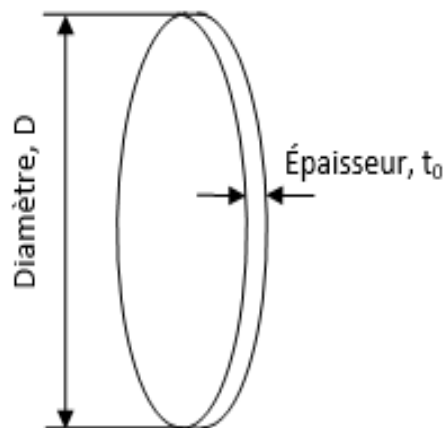


Figure 3. 6: Représentation schématique de la poudre compacte[46].

L'analyse effectuée par D.R.Maurice et T.H.Courtney [42], montre que seule une petite fraction  $\psi$  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 :

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

Avec :

$\psi$  : 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.

### 3.6 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.

### 3.6.1 Première approche (cas semi-infini) :

Dans le cas de mécanosynthèse, comme le montre la figure (3.7), 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 [46].

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 :

$$q_1 = \frac{(1-\delta)Q}{\pi r_0^2 \Delta \tau} \quad (3.3)$$

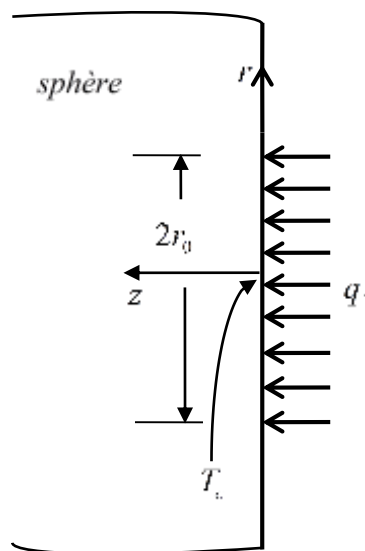


Figure 3. 7: Assimilation de la bille à un corps semi-infin [46].

Où :

$\delta$  : représente la fraction de la chaleur produite dans la poudre ;

$(1-\delta)$  : représente la fraction produite dans la bille ;

$Q$  : représente une quantité moyenne engendrée par le processus de déformation totale après une période  $\Delta\tau$ .

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

$$T_c = T_0 + \frac{2q_1\sqrt{\alpha_s\Delta\tau}}{K_s} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{\alpha_s\Delta\tau}} \right\} \quad (3.4)$$

Avec :

$\alpha_s$  : La diffusivité thermique de la bille en  $\text{m}^2/\text{s}$  ;

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

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

La durée de l'impact  $\Delta\tau$  et le rayon de contact  $r_0$  se calculent suivant l'analyse hertzienne par les relations (3.6 et 3.7) [40].

$$\Delta\tau = 2.787V^{-0.2} \left( \frac{\rho_s}{E} \right)^{0.4} R_b \quad (3.5)$$

$$r_0 = 0.973IV^{0.4} \left( \frac{\rho_s}{E} \right)^{0.2} R_b \quad (3.6)$$

Où :

$E$ : Module d'Young en  $(\text{N}/\text{m}^2)$ ;

$R_b$  : Rayon de la bille en (m).



### 3.6.2 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 (3.8) sur une surface  $x=t_0/2$ , avec un flux de chaleur  $q_2$  donné par :

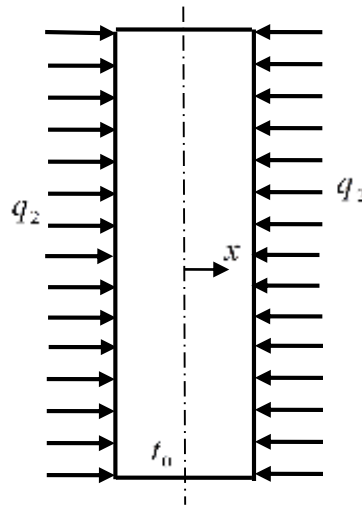


Figure 38 .: Assimilation de la poudre compacte à une plaque plane à une dimension[46].

$$q_2 = \frac{\delta Q}{\pi r_0^2 \Delta \tau} \quad (3.7)$$

Où :

$\delta$  : Fraction de la chaleur produite dans la poudre ;

$Q$  : Quantité moyenne engendrée par le processus de déformation totale, J ;

$r_0$  : Rayon de la poudre compacte, m ;

$\Delta \tau$  : Temps d'impact, s.

Pour des raisons de symétrie [46], 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 vrai à cause de la grandeur du rapport  $2 r_0/t_0$ .

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

$$T(x) = T_0 + \frac{2q_2\Delta\tau}{\rho_c C_p t_0} + \frac{q_2 t_0}{2K_c} \left\{ \frac{12x^2 - t_0^2}{6t_0^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{4n^2\pi^2\alpha_c\Delta\tau}{t_0^2}\right) \cos\left(\frac{2n\pi x}{t_0}\right) \right\} \quad (3.8)$$

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 :

$$T_c = T_0 + \frac{2q_2\Delta\tau}{\rho_c C_p t_0} + \frac{q_2 t_0}{2K_c} \left\{ \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{4n^2\pi^2\alpha_c\Delta\tau}{t_0^2}\right) \cos(n\pi) \right\} \quad (3.9)$$

La continuité de la température implique une équivalence entre la température de contact donnée par la relation (3.4) et celle donnée par la relation (3.9) ce qui nous conduit à la relation (3.39) [28] :

$$\frac{2q_1\sqrt{\alpha_s\Delta\tau}}{K_s} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} - ierfc\left(\frac{r_0}{2\sqrt{\alpha_s\Delta\tau}}\right) \right\} = \frac{2q_2\Delta\tau}{\rho_c C_p t_0} + \frac{q_2 t_0}{2K_c} \left\{ \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{4n^2\pi^2\alpha_c\Delta\tau}{t_0^2}\right) \cos(n\pi) \right\} \quad (3.10)$$

La fraction  $\delta$  de la chaleur partagée entre la poudre compacte et la bille peut être obtenue par la relation (3.9). Concernant le profil de température, il pourra être déterminé par l'équation (3.4).

### 3.6.3 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  $\Delta\tau$ .

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  $t=0$  comme le montre la figure (3.9).

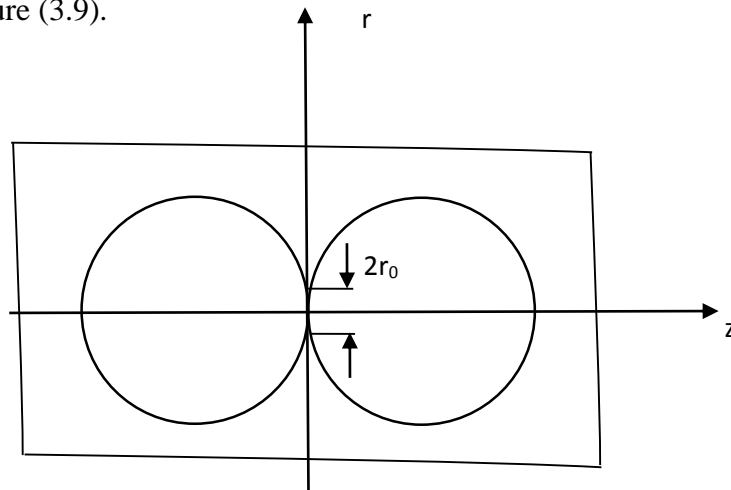


Figure 3.9 : Assimilation du système à une source plane instantanée[46].

Dans ce cas la température de contact  $T_c$  à la fin de l'impact sera donnée par la relation (3.11) citée en dessous:

$$T_c = T_0 + \frac{Q}{2\pi r_0^2 \rho_s C_{ps} \sqrt{\pi \alpha_s \Delta\tau}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4\alpha_s \Delta\tau}\right) \right\} \quad (3.11)$$

Où,

$\rho_s$  : Densité volumique de la bille en  $\text{Kg/m}^3$  ;

$C_{ps}$  : Chaleur spécifique de la bille en  $\text{J/Kg. } ^\circ\text{K}$ .

### 3.7 Objectif:

Plusieurs études ont montré que l'élévation de la température au cours de la mécanosynthèse joue un rôle très important sur la structure des phases induites par broyage [46].

En effet, l'amorphisation, la cristallisation et/ou l'obtention d'un composé intermétallique n'est pas uniquement le fruit d'un broyage intensif mais aussi le résultat d'un chauffage.

Hélas, la température locale est difficile à mesurer directement en raison de son caractère microscopique. Malgré tout, certains auteurs [50] ont essayé d'en déterminer des valeurs aussi précises que possible, soit directement par des mesures infrarouges, soit indirectement en utilisant la connaissance des températures des transformations de phases ou des coefficients de diffusion.

Notre travail dans ce chapitre consistait à élaborer un programme qui permettra de calculer la température de contacts entre bille-poudre et bille-bille durant le broyage, en utilisant toutes les équations développées aux chapitres 2 et 3, en faisant varier les paramètres suivants :

a) Paramètres géométriques

- Diamètre de la bille,  $D_b$  ;
- Position angulaire du plateau  $\theta$  par rapport à celle de la jarre  $\phi$  ;
- Distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre ;
- Rayon de la jarre.

b) Paramètres dynamiques

- Rapport des vitesses de rotation de la jarre et du plateau,  $w_v / w_d$  ;
- L'énergie cinétique de choc,  $E_c$  ;
- La fréquence de choc,  $f_c$  ;
- La puissance de choc,  $P_c$ .

c) Paramètres thermophysiques

- La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique.

### 3.8 Conditions de broyage:

Toute notre étude a été réalisée avec un broyeur planétaire type « PM 400 » de marque Retsch (figure 4.1). Il permet le broyage à sec et à l'état humide. Ci-joint, les principales caractéristiques de ce broyeur :



*Figure 3.10: Broyeur planétaire type PM 400.*

Matériaux	Conductivité thermique [W/m.K]	Chaleur Spécifique [J/Kg.K]	Densité [Kg/m <sup>3</sup> ]	Module d'Young [N/m <sup>2</sup> ]
Aluminium	238	917	2700	0.69 10 <sup>11</sup>
Titane	16	528	4500	1.14 10 <sup>11</sup>
Acier inoxydable (billes)	16	120	7800	1.79 10 <sup>11</sup>

Tableau 3.1: Propriétés thermophysiques des billes et des poudres [52].

### 3.9. Programme de calcul :

Le programme de calcul a été élaboré avec le MATLAB R2016a. Ce dernier permet d'étudier l'influence de la variation des différents paramètres physiques sur la température de broyage.

Il est composé de plusieurs étapes :

1- Entrée des valeurs des propriétés thermophysiques de la bille et de la poudre :

$C_{p_s}, \rho_s, K_s, C_{p_c}, \rho_c, K_c, E$  ;

2- Entrée la valeur des paramètres :  $T_0, r_d, r_v, r^*, w_d, w_v, r_b, m_p$  ;

3- Calcul de la vitesse de choc,  $v = f(r_d, r^*, w_d, w_v)$  ;

4- Calcul des diffusivités thermiques de la bille et de la poudre :  $\alpha_s, \alpha_p$  ;

5- Calcul de la masse de la bille,  $m_b$  ;

6- Choix raisonnable du coefficient de déformation plastique de la bille,  $\psi$  ;

7- Calcul de l'énergie cinétique,  $E_c$  ;

8- Calcul de la quantité de chaleur dissipée,  $Q$  ;

9- Calcul du temps de décollage de la bille,  $t$  ;

10- Calcul du temps de collision,  $\Delta t$  ;

11- Calcul de la fréquence de choc de la bille,  $f$  ;

12- Calcul du rayon de la poudre compacte,  $r_0$  ;

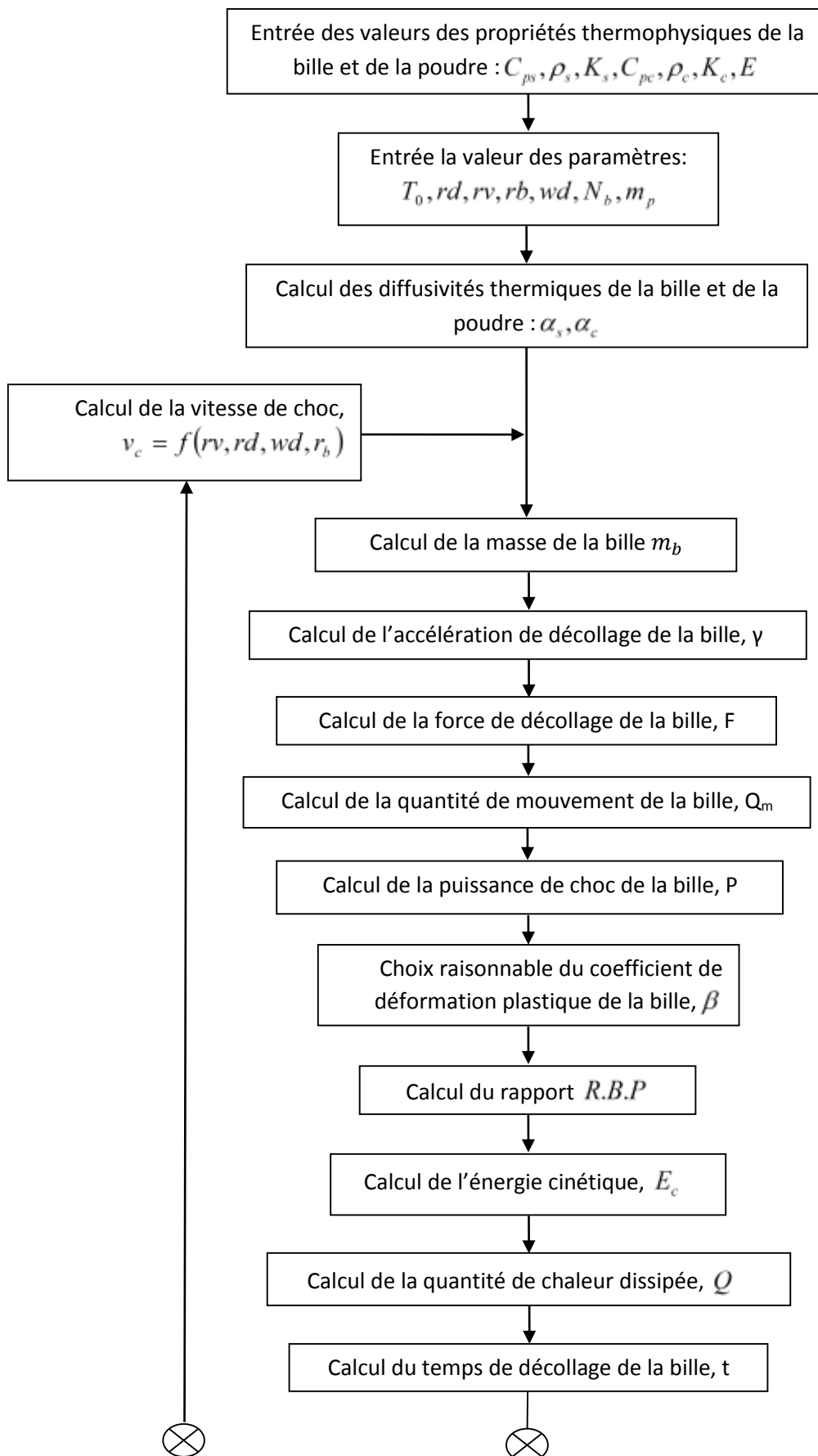
13- Calcul de l'épaisseur de la poudre compacte,  $t_0$  ;

14- Calcul de la fraction de chaleur partagée,  $\delta$  ;

### *Chapitre 03: La Temperature en Mécanosynthèse dans le Broyeur Planétaire*

---

- 15- Calcul du flux de chaleur,  $q_1$  ;
- 16- Calcul du flux de chaleur,  $q_2$ ;
- 17- Calcul de la température de contact bille-poudre,  $T_{c1}$  ;
- 18- Calcul de la température de contact bille-bille,  $T_{c2}$  ;
- 19- Affichage des résultats.





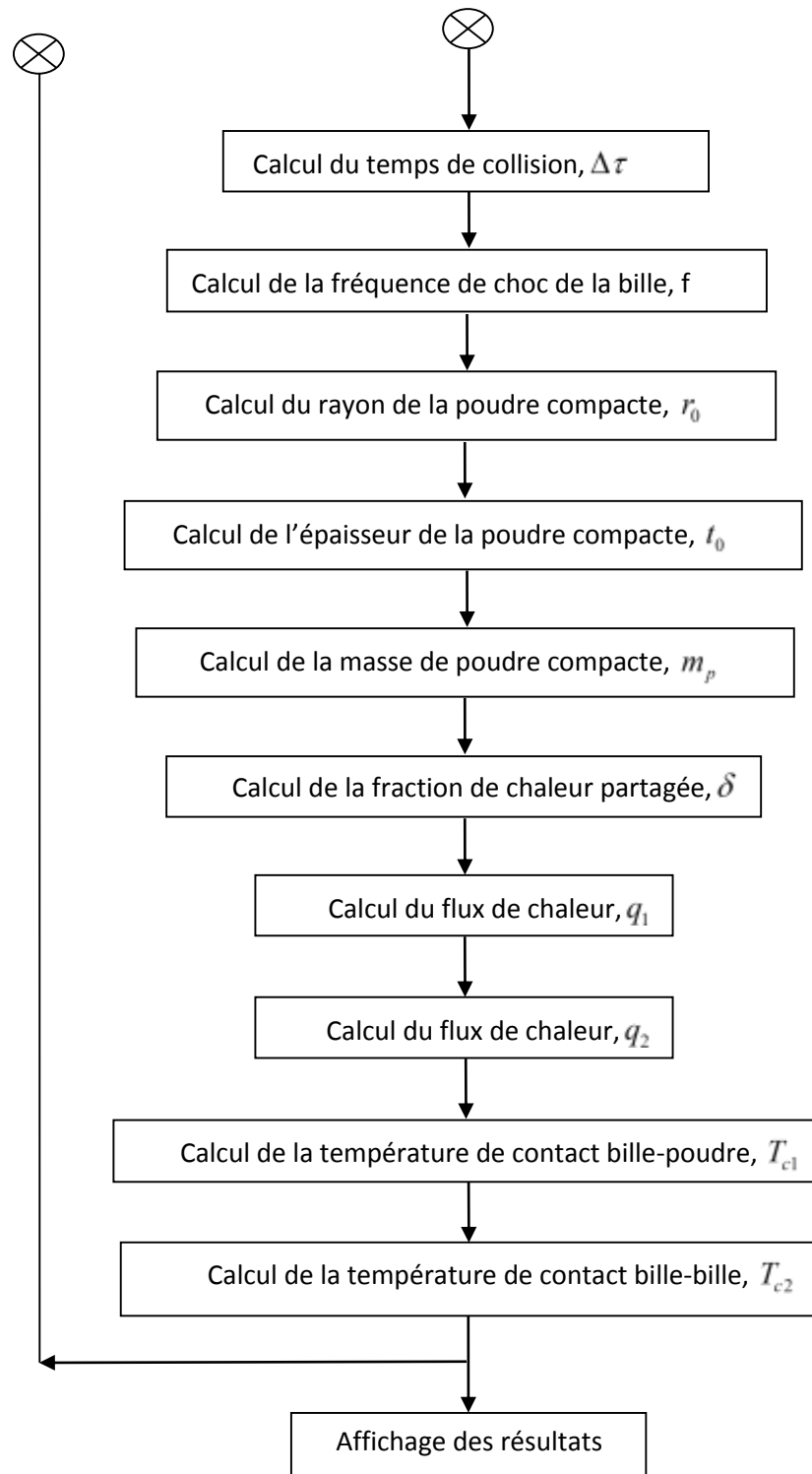


Figure 3.11: Schéma de calcul de la température de broyage.

# **CHAPITRE 04 :**

## **Resultats et Discussions**

#### 4.1. Influence de la position angulaire du plateau :

On fait varier des principaux paramètres physiques, dynamiques et thermophysiques ayant une influence directe sur la variation de la température à l'intérieur de la jarre tout en faisant varier la vitesse de rotation de plateau  $w_d$  de 0 tr/min à 300 tr/min.

#### 4.1.1 Températures de contacts Bille-Bille et Bille-Poudre en fonction de la vitesse de choc :

Vitesse angulaire de plateau $w_d$ (tr/min)	Vitesse de choc (m/s)	Temperature de contact bille –poudre (c°)	Temperature de contact bille – bille (c°)
0	/	/	/
20	0.3356	28.4807	29.5382
40	0.6711	33.3949	36.1743
60	1.0067	39.0707	43.9295
80	1.3422	45.3117	52.5144
100	1.6778	52.0131	61.7742
120	2.0133	59.1079	71.6100
140	2.3489	66.5489	81.9521
160	2.6844	74.3009	92.7485
180	3.0200	82.3361	103.9583
200	3.3555	90.6324	115.5488
220	3.6911	99.1712	127.4927
240	4.0266	107.9370	139.7673
260	4.3622	116.9166	152.3529
280	4.6977	126.0984	165.2326
300	5.0333	135.4723	178.3915

*Tableau 4.1.a: Variation de la température de contact en fonction de la vitesse de choc de la bille pour un diamètre de bille  $d = 20$  mm;*

Vitesse angulaire de plateau $w_d$ (tr/min)	Vitesse de choc (m/s)	Temperature de contact bille – poudre (°C)	Temperature de contact bille – bille (°C)
0	/	/	/
20	0.3246	30.4598	31.1467
40	0.6492	37.9958	40.1350
60	0.9738	46.6039	50.6389
80	1.2984	55.9987	62.2666
100	1.6229	66.0297	74.8085
120	1.9475	76.6014	88.1305
140	2.2721	87.6468	102.1383
160	2.5967	99.1164	116.7612
180	2.9213	110.9713	131.9443
200	3.2459	123.1804	147.6429
220	3.5705	135.7180	163.8203
240	3.8951	148.5625	180.4454
260	4.2197	161.6955	197.4919
280	4.5442	175.1010	214.9367
300	4.8688	188.7651	232.7595

Tableau 4.1.b: Variation de la température de contact en fonction de la vitesse de choc de la bille pour un diamètre de bille  $d = 40$  mm;

la température de contact bille-bille et bille-poudre en fonction de la vitesse de choc pour la vitesse de rotation du plateau du broyeur planétaire varié entre 0 et 300 tr/min «type PM 400 », rayon de la jarre  $r_v = 42.5$  mm ,et la distance entre le centre de plateau et le centre de la jarre  $r_d = 150$  mm et des diamètres des billes : ( $d = 20$  et  $40$  mm),coefficient de déformation  $\psi = 0.03$  . ainsi que pour un rapport des vitesses de rotation, $w_v/w_d=2$ .est représentée dans la figure (4.1).

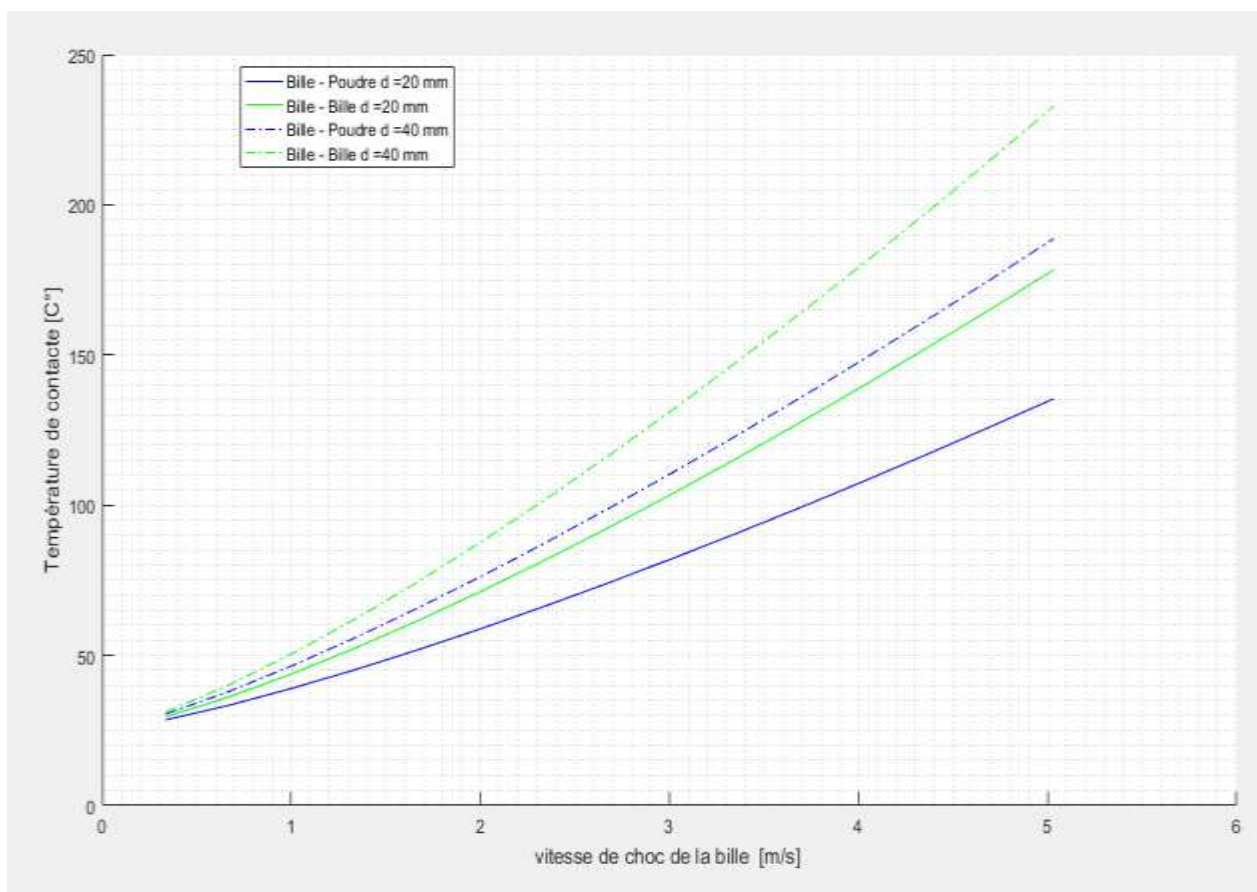


Figure 4. 1: Températures de contacts des billes et de l'alliage des poudres AlTi en fonction de la vitesse de choc de la bille du broyeur planétaire «type PM 400 ».

Le comportement des deux modèles (diamètre : 20 et 40 mm) semble identique.

Nous pouvons noter que les valeurs de la température de contact sont croissantes, les plus élevées sont celles de la bille de 40 mm.

En effet, la vitesse de choc de la bille dépend des vitesses de rotation de la jarre et du plateau. De plus, la différence d'énergie cinétique  $\Delta E$  avant et après le choc ne peut être dissipée entièrement dans le matériau, sous forme de défauts, une dissipation d'énergie par effet de joule est à considérer au niveau des surfaces des billes. C'est pour cette raison, qu'on assiste à des élévations de températures locales.

L'énergie cinétique de choc augmente en fonction du rayon de la bille utilisée. Ceci est lié à l'augmentation de la masse de cette dernière ( $\varnothing$  40 mm).

La figure (4.1) représente aussi, la variation de la température de contact bille-poudre en fonction de la vitesse de choc des billes pour une poudre composée de deux matériaux qui sont : l'aluminium et le titane.

Les températures présentent un déplacement vers des hautes valeurs allant d'un minimum de 28 °C à un maximum 233 °C.

En effet, le broyage des poudres pré-alliées se traduit par un transfert d'énergie des outils de broyages (billes et parois des jarres) vers les poudres.

L'une des particularités de la mécanosynthèse est la présence de fortes densités de défauts d'une part, d'autre part, des contraintes dans les poudres impactées. Ces dernières favorisent:

- L'élévation de l'énergie libre des particules;
- L'élévation de la température due à une transformation adiabatique du travail de déformation, de la contrainte de compression ou de la contrainte de cisaillement, en énergie calorifique (dissipation de l'énergie par effet joule).

L'élévation de la température de contact de la poudre d'alliage AlTi est liée au coefficient de diffusivité de l'alliage ( $\alpha_c = 4,8827 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ), c'est la nature du matériau considéré.

### 4.2. Variation de la température en fonction de la distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre (**rd**) :

Les courbes dans la figure (4.2) représentent la variation des températures de contacts des billes et des poudres d'alliage, ainsi que la vitesse de choc des billes en fonction de la variation de  $r_d$ , distance du centre du plateau au centre de la jarre.

L'étude a été réalisée en tenant compte des :

- Rapports des vitesses de rotation,  $w_v / w_d = 2$  ;
- Diamètre jarre fixé à 85 mm ;
- Diamètre bille fixé à 20 mm ;
- Vitesse angulaire fixé à 300 tr/min ;
- coefficient de déformation  $\psi = 0.03$ .

Nous pouvons remarquer que les températures de contacts et la vitesse de choc sont proportionnelles à la distance du centre du plateau au centre de la jarre  $r_d$ . Ce dernier est considéré comme un bras de levier nécessaire à la création d'un moment favorisant une rotation plus importante du plateau. L'élévation de la température de contacts bille-bille et bille-poudre augmente avec l'énergie cinétique de choc. Cette dernière est due à une conversion adiabatique du travail de déformation et permet par la suite l'augmentation de la puissance de choc.

De cette étude, nous pouvons affirmer que l'obtention d'un résultat plutôt qu'un autre est, certes, fonction du matériau lui-même mais il est étroitement lié aux caractéristiques du broyeur et aux conditions opératoires de broyage.

la distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre $r_d$ (mm)	Vitesse de choc (m/s)	Temperature de contact bille – poudre (°C)	Temperature de contact bille – bille (°C)
0	1.7685	53.8941	64.3791
10	1.7961	54.4739	65.1824
20	1.8768	56.1764	67.5426
30	2.0039	58.9043	71.3274
40	2.1695	62.5298	76.3631
50	2.3653	66.9224	82.4718
60	2.5847	71.9655	89.4939
70	2.8220	77.5618	97.2957
80	3.0731	83.6328	105.7689
90	3.3349	90.1161	114.8271
100	3.6051	96.9620	124.4013
110	3.8820	104.1308	134.4361
120	4.1641	111.5903	144.8864
130	4.4505	119.3143	155.7153
140	4.7404	127.2811	166.8923
150	5.0333	135.4723	178.3915

*Tableau 4.2 : Variation de la température de contact et la vitesse de choc de la bille en fonction de la distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre  $r_d$  ;*

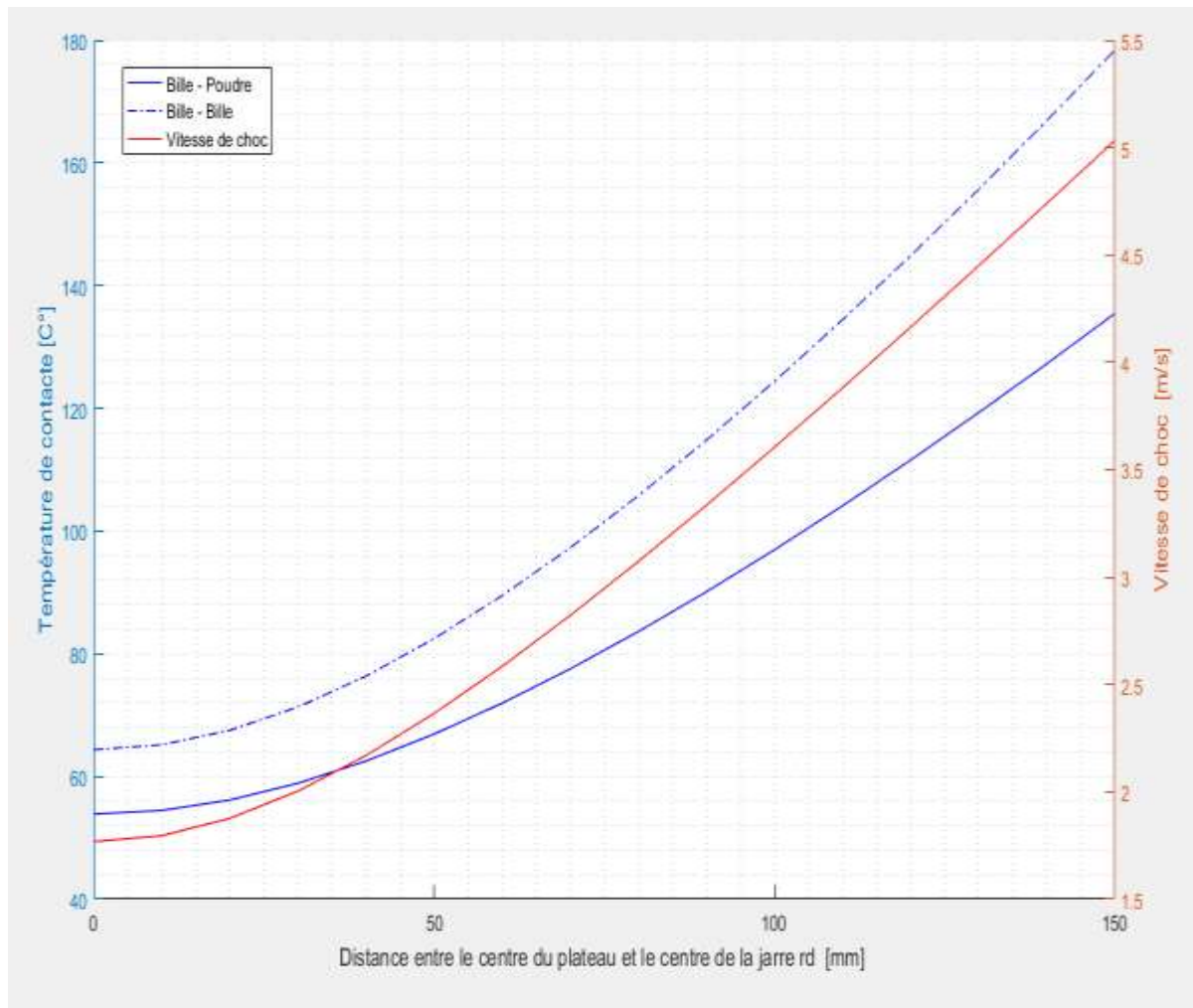


Figure 4.2: Températures de contacts des billes et de l'alliage des poudres AlTi ainsi que la vitesse de choc des billes, en fonction de la distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre.

#### 4.3. Variation du Rayon de la jarre :

L'étude a été réalisée en tenant compte des :

- Rapports des vitesses de rotation,  $w_v/w_d = 2$  ;
- Diamètre plateau fixé à 300 mm ;
- Diamètre bille fixé à 20 mm ;
- Vitesse angulaire fixé à 300 tr/min ;
- Coefficient de déformation  $\psi = 0.03$  ;



Rayon de la jarre $r_d$ (mm)	Vitesse de choc (m/s)	Temperature de contact bille – poudre (c°)	Temperature de contact bille – bille (c°)
10.0000	4.7124	126.5037	165.8014
12.5000	4.7144	126.5581	165.8776
15.0000	4.7202	126.7210	166.1063
17.5000	4.7300	126.9922	166.4869
20.0000	4.7437	127.3712	167.0188
22.5000	4.7612	127.8574	167.7012
25.0000	4.7826	128.4499	168.5328
27.5000	4.8076	129.1478	169.5122
30.0000	4.8364	129.9498	170.6380
32.5000	4.8688	130.8547	171.9082
35.0000	4.9048	131.8610	173.3209
37.5000	4.9443	132.9671	174.8739
40.0000	4.9871	134.1715	176.5649
42.5000	5.0333	135.4723	178.3915

*Tableau 4.3: Variation de la température de contact et la vitesse de choc de la bille en fonction de rayon de la jarre  $r_v$ ;*

Les courbent dans la figure (4.3) représentent la variation des températures de contacts des billes et des poudres d'alliage AlTi, ainsi que la vitesse de choc des billes en fonction de la variation de  $r_v$ , rayon de la jarre.

Nous pouvons remarquer que les températures de contacts et la vitesse de choc sont proportionnelles au rayon de la jarre  $r_v$ .

Nous pouvons également remarquer que plus le diamètre des jarres est grand, plus le rebondissement des billes sera grand et par conséquent la dissipation de l'énergie sera plus importante. Cette dernière est convertie en énergie calorifique, d'où l'élévation de la température à l'intérieur de la jarre.

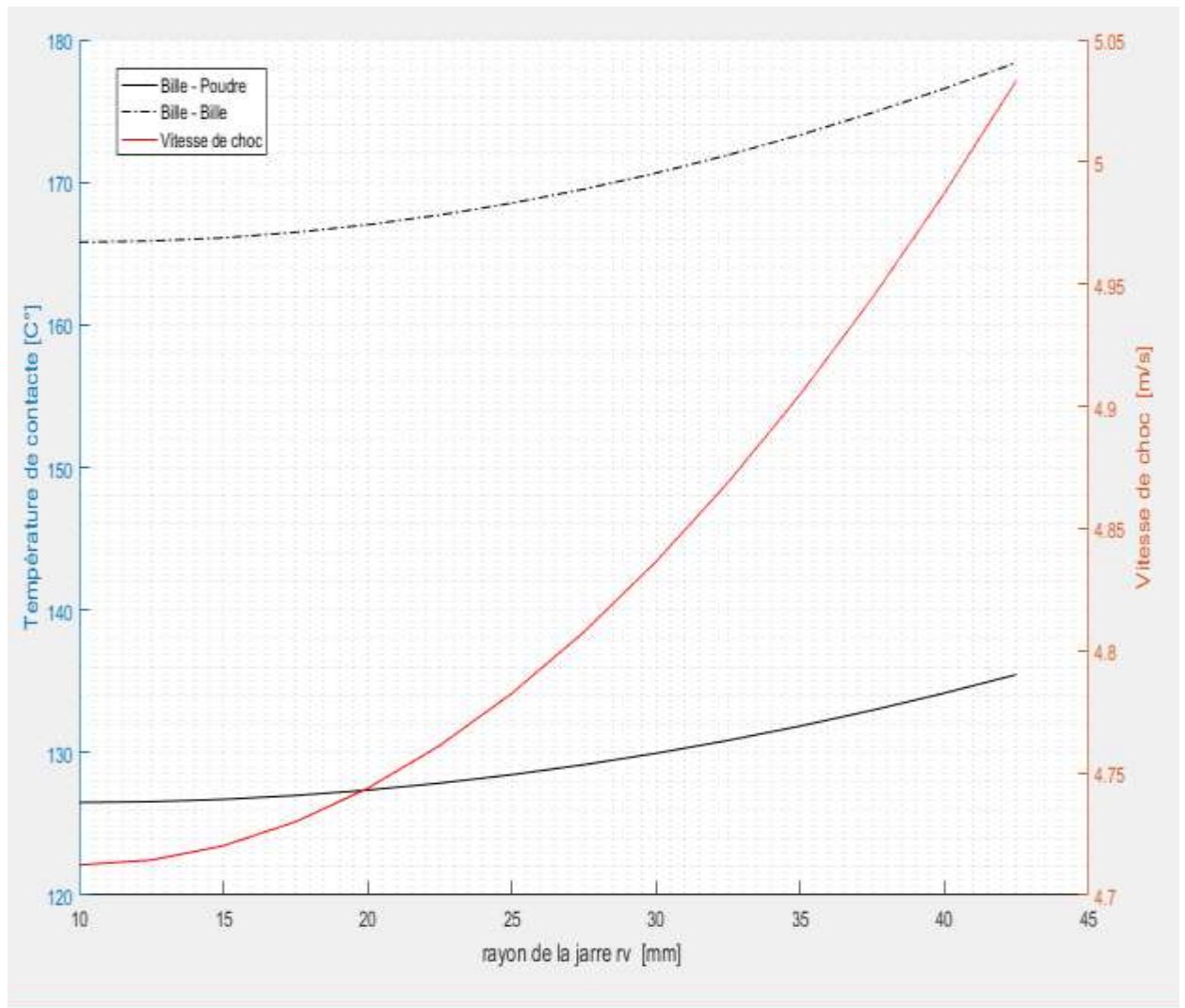


Figure 4. 3: Températures de contacts des billes avec les poudres d'alliage AlTi, et la vitesse de choc des billes, en fonction du rayon de la jarre.

#### 4.4. Influence de la vitesse de choc sur l'énergie d'impact :

Les courbent dans la figure (4.4) représentent la variation de l'énergie d'impact de la bille en fonction de la variation de la vitesse de choc de bille.

L'étude a été réalisée en tenant compte des :

- Diamètre plateau fixé à 300 mm ;
- Diamètre jarre fixé à 85 mm ;
- Diamètres des billes ( $d = 10$  et  $d = 20$  mm) ;
- Vitesse angulaire de  $[0, 300]$  tr/min.

Vitesse angulaire de plateau $w_d$ (tr/min)	Diamètre de la bille =10 mm		Diamètre de la bille =20 mm	
	Vitesse de choc de la bille (m/s)	l'énergie d'impact (J)	Vitesse de choc de la bille (m/s)	l'énergie d'impact (J)
0	/	/	/	/
20	0.3423	0.0002	0.3356	0.0018
40	0.6847	0.0010	0.6711	0.0074
60	1.0270	0.0022	1.0067	0.0166
80	1.3694	0.0038	1.3422	0.0294
100	1.7117	0.0060	1.6778	0.0460
120	2.0541	0.0086	2.0133	0.0662
140	2.3964	0.0117	2.3489	0.0901
160	2.7388	0.0153	2.6844	0.1177
180	3.0811	0.0194	3.0200	0.1490
200	3.4235	0.0239	3.3555	0.1839
220	3.7658	0.0290	3.6911	0.2226
240	4.1082	0.0345	4.0266	0.2649
260	4.4505	0.0404	4.3622	0.3109
280	4.7929	0.0469	4.6977	0.3605
300	5.1352	0.0538	5.0333	0.4139

Tableau 4.4: Variation de l'énergie d'impact en fonction de la vitesse de choc de la bille pour diamètres des billes ( $d = 10$  et  $d = 20$  mm) ;

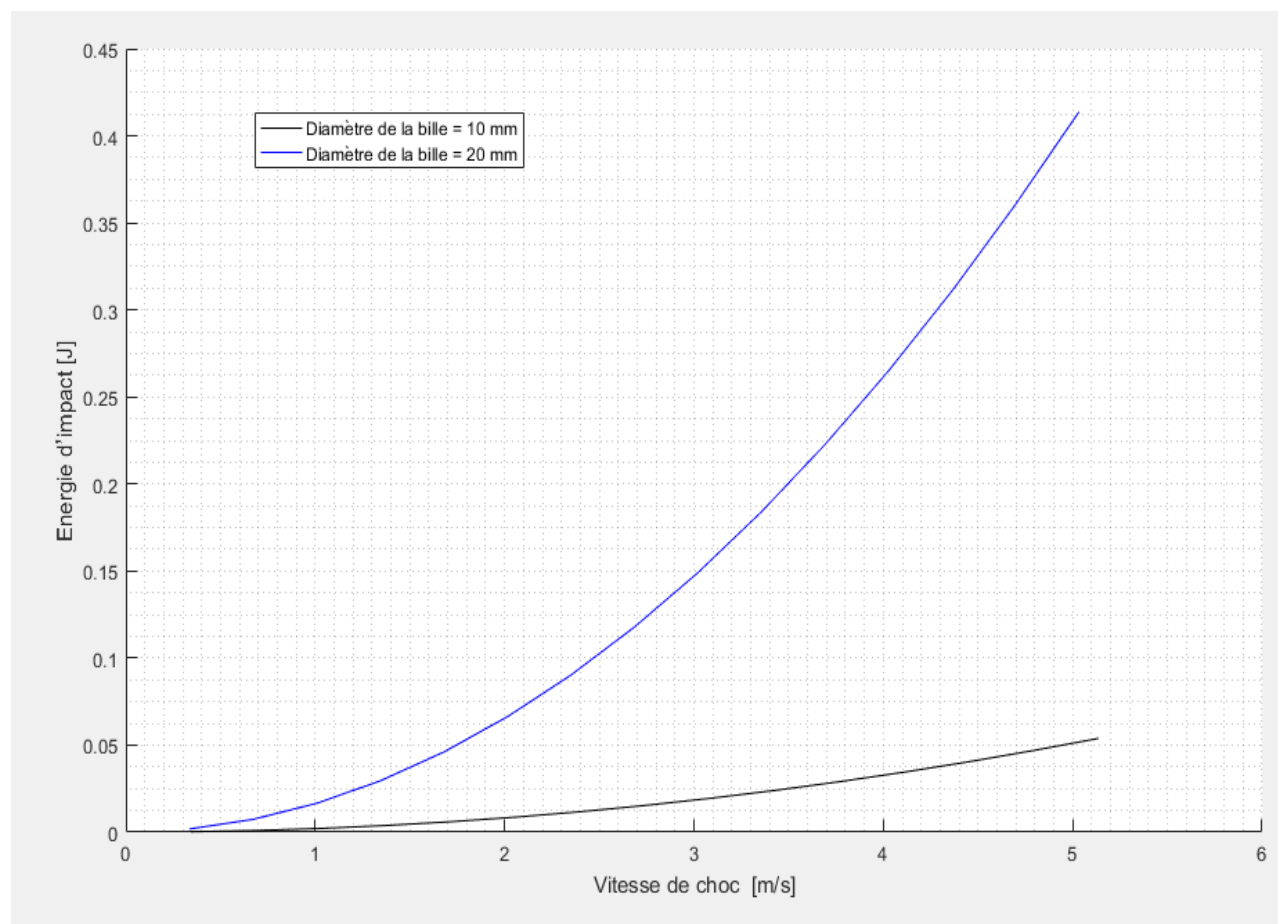


Figure 4.4: Energie d'impact en fonction de vitesse de choc pour diamètre des billes, ( $d = 10$  et  $d = 20$  mm).

D'après l'étude faite dans le chapitre 02, l'énergie cinétique de choc,  $E_i = \frac{1}{2} mv^2$ , dépend de la vitesse relative 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 tandis que on augmente le rayon de la bille, et on simule pour les mêmes paramètres (poids, diamètre, ...etc.).

Comme le montre la figure (4.4), les valeurs de l'énergie d'impact augmentent proportionnellement avec l'augmentation des rayons et de vitesse de choc de la bille, C'est une augmentation parabolique.

Nous concluons que L'augmentation de la vitesse de choc et de rayons de bille améliore l'apport d'énergie de broyage.

4.5. Variation de la température en fonction du rapport masse billes sur masse poudre (RBP) :

Les courbes dans la figure (4.7) représentent la variation de la température en fonction de la variation du rapport masse billes sur masse poudre :

L'étude a été réalisée en tenant compte des :

- Diamètre plateau fixé à 300 mm ;
- Diamètre jarre fixé à 85 mm ;
- Diamètres des billes [1,10 mm] ;
- Nombres des billes 100 ;
- Vitesse angulaire de 300 tr /min ;
- coefficient de déformation  $\psi = 0.03$  ;
- Masse de la poudre = 40 g.

Nous avons les courbes de la figure (4.5) qui représentent la température de contact bille-poudre en fonction du rapport masse billes sur masse poudre (RBP), cette dernière augmente proportionnellement de la fonction logarithmique avec ce rapport.

En fixant la charge des poudres et en variant le rayon des billes d'une façon croissante, par conséquent on aura une augmentation de la masse des billes, ce qui va entraîner un échauffement relativement rapide à l'intérieur de la jarre.

On conclue que l'augmentation de la masse des billes entraine un broyage plus intense et plus efficace suivi d'une élévation locale relativement rapide de la température.

Diamètres des billes (mm)	Rapport masse billes /masse poudre (RBP)	Temperature de contact bille – poudre (°C)	Temperature de contact bille – bille (°C)
1	0.0102	50.3614	61.1177
2	0.0817	60.7613	75.9285
3	0.2757	68.6710	87.1929
4	0.6535	75.2814	96.6069
5	1.2763	81.0558	104.8296
6	2.2054	86.2341	112.2005
7	3.5021	90.9621	118.9218
8	5.2276	95.3378	125.1261
9	7.4432	99.4321	130.9056
10	10.2102	103.2987	136.3278

Tableau 4.5: Variation de la température de contact en fonction de rapport masse billes sur masse poudre (RBP);

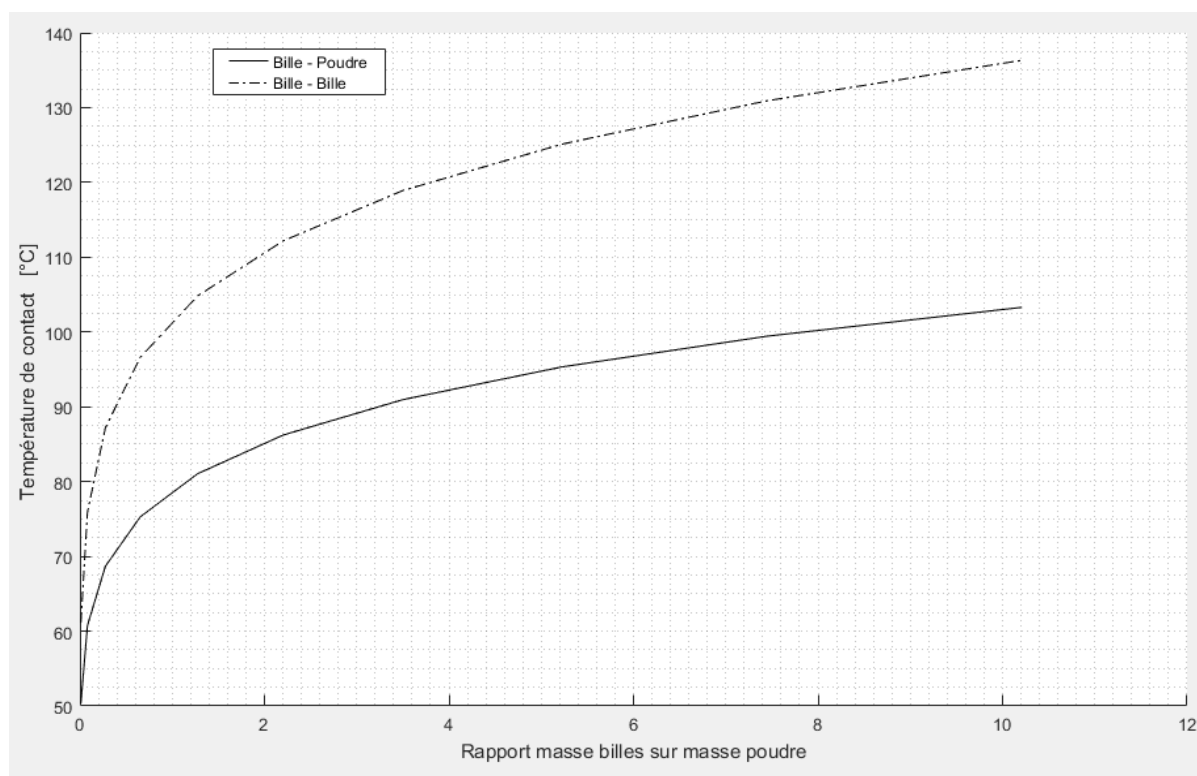


Figure 4.5: Température de contact en fonction du rapport masse billes / masse

#### 4.6. Variation de la température en fonction de la vitesse angulaire du plateau :

Sachant que nous avons pris les mêmes contions de broyage :

- La vitesse de rotation du plateau,  $w_d = [0, 300]$  tr/min ;
- La distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre ,  $r_d = 150$  mm ;
- Le rayon de la jarre,  $r_v = 42.5$  mm ;
- Le rayon de la bille,  $r_b = 10$  mm.

Nous remarquons que les courbes données dans la figure (4.6) qui représentent la température de contact bille-bille et bille-poudre ainsi que la vitesse de choc de la bille en fonction de la vitesse angulaire du plateau sont croissantes, cela signifie que l'augmentation de la température de contact de la poudre et celle de la bille sont proportionnelles à la vitesse angulaire du plateau, car cette dernière dépend de l'expression de la vitesse de choc de la bille, qui elle même, dépend de l'équation de la température de contact.

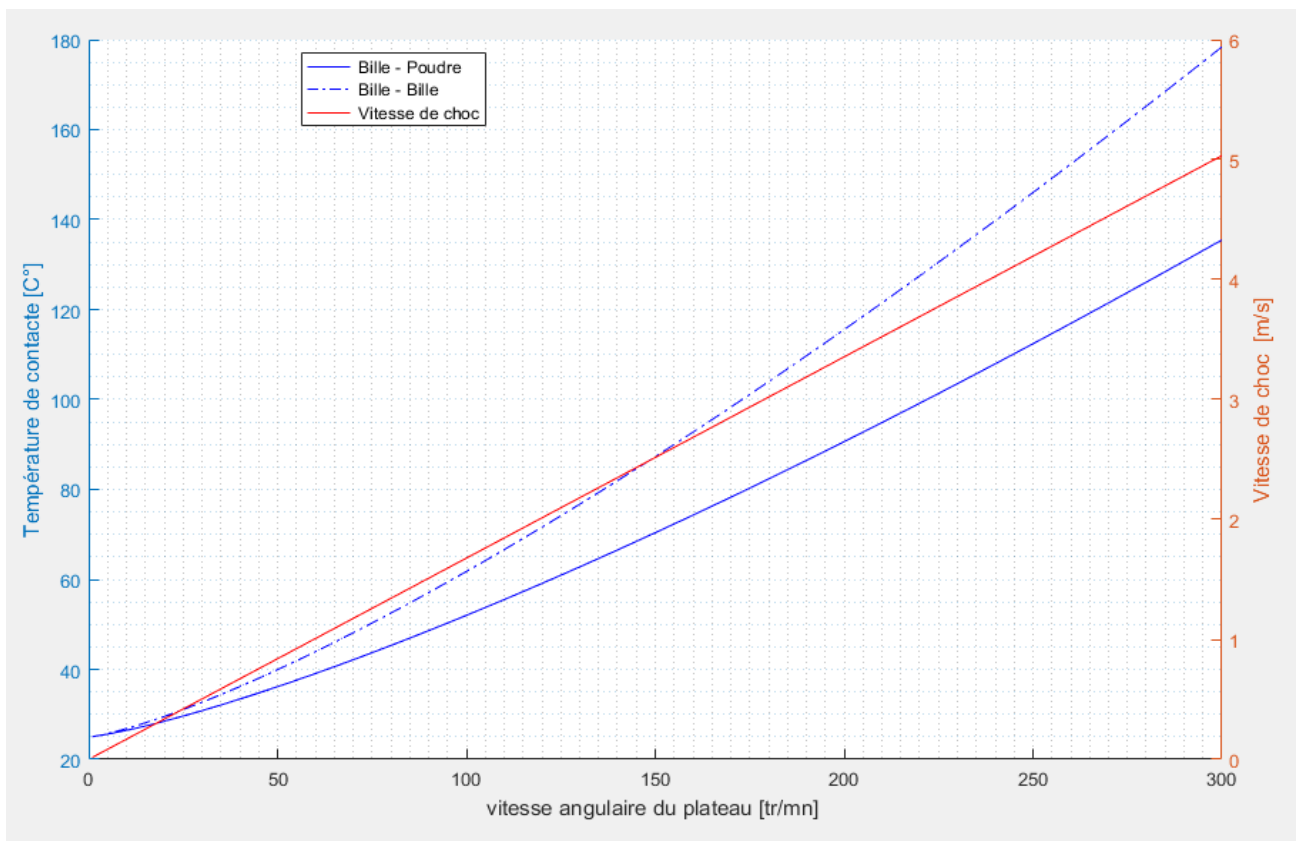


Figure 4.6: Température de contact en fonction de la vitesse angulaire du plateau,

4.7.Variation de la température de contact en fonction de l'énergie cinétique de la bille:

Schant que nous avons pris les mêmes conditions de broyages suivantes :

- La vitesse de rotation du plateau,  $w_d = 300$  tr/min ;
- La distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre ,  $r_d=[0 , 150]$  mm ;
- Le rayon de la jarre,  $r_v= 42.5$  mm ;
- Le rayon de la bille,  $r_b= 10$  mm.

La figure (4.7) représente les températures de contact bille-bille et bille-poudre en fonction de l'énergie cinétique de la bille, on remarque que ces températures augmentent en fonction de l'énergie cinétique de la bille. Cette dernière dépend de la vitesse de la bille qui influe sur la température de contact, en plus cette énergie dépend aussi de la masse des billes , plus on augmente cette masse, plus les températures de contacts des billes et poudres augmentent aussi.

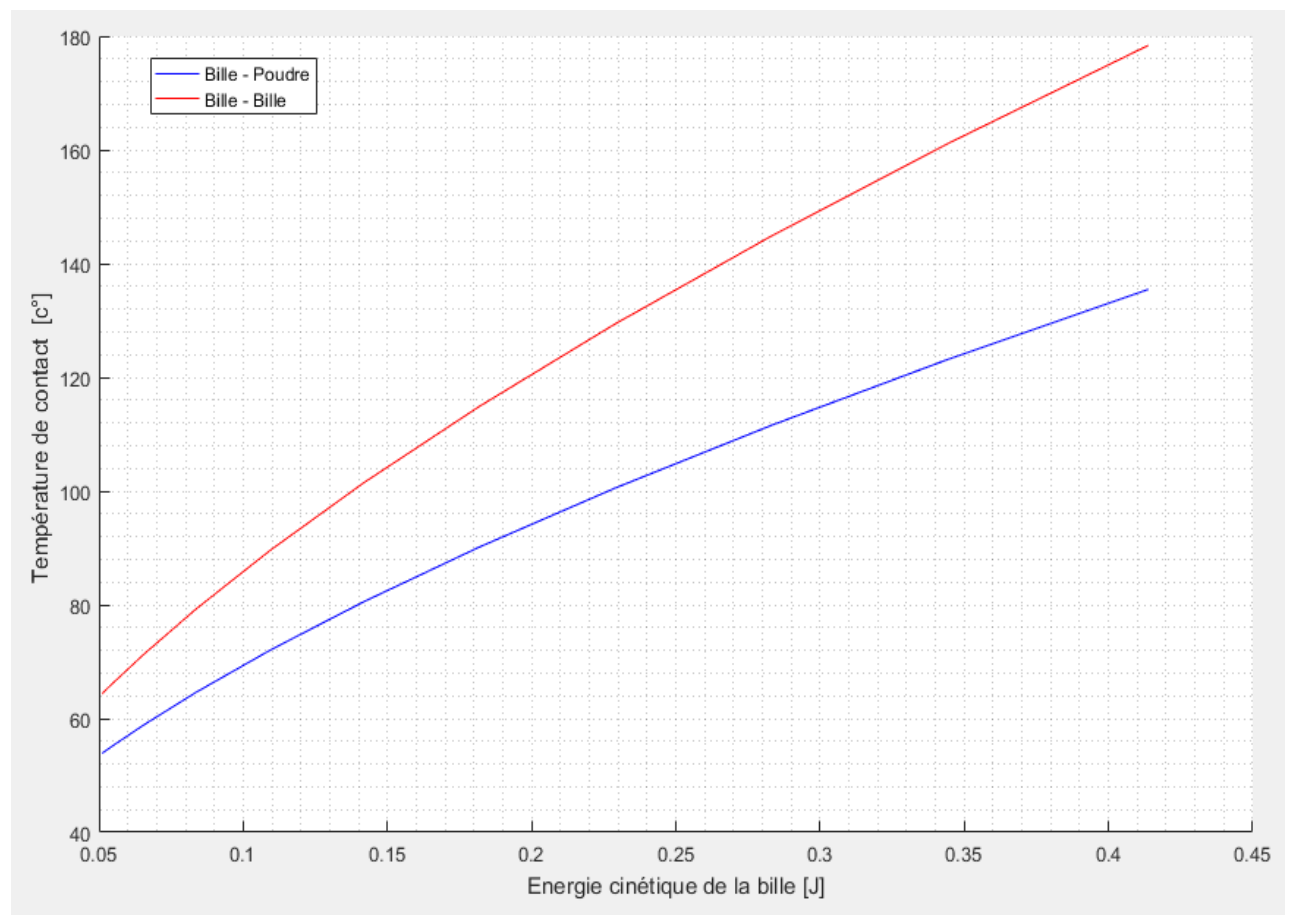


Figure 4. 7: Température de contact en fonction de l'énergie d'impact de la bille,



distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre $r_d$ (mm)	Energie d'impact (J)	Température de contact bille – poudre (°C)	Température de contact bille – bille (°C)
0	0.0511	53.8941	64.3791
10	0.0527	54.4739	65.1824
20	0.0575	56.1764	67.5426
30	0.0656	58.9043	71.3274
40	0.0769	62.5298	76.3631
50	0.0914	66.9224	82.4718
60	0.1091	71.9655	89.4939
70	0.1301	77.5618	97.2957
80	0.1543	83.6328	105.7689
90	0.1817	90.1161	114.8271
100	0.2123	96.9620	124.4013
110	0.2462	104.1308	134.4361
120	0.2833	111.5903	144.8864
130	0.3236	119.3143	155.7153
140	0.3671	127.2811	166.8923
150	0.4139	135.4723	178.3915

Tableau 4.7: Variation de la température de contact en fonction de l'énergie d'impact;

CONCLUSION :

L'élaboration des matériaux par la mécanosynthèse est un procédé mécanique intéressant par rapport aux méthodes de croissance cristalline habituelle de part son moindre coût et de part, sa rapidité de mise en oeuvre.

La mécanosynthèse est une technique récente principalement utilisée dans le cas où la connaissance des diagrammes de phase est incomplète voire inexistante. Elle n'en demeure pas moins intéressante pour l'élaboration des nanomatériaux en général.

Le premier objectif de notre étude était l'étude de l'aspect thermique du processus de la mécanosynthèse. En effet, l'amorphisation, la cristallisation et/ou l'obtention d'un composé intermétallique n'est pas uniquement le fruit d'un broyage intensif mais aussi le résultat d'un chauffage.

Après une étude bibliographique, nous avons particulièrement porté notre attention, dans la seconde partie, sur l'analyse cinématique de la mécanosynthèse dans un broyeur planétaire. En effet, cette analyse permet de définir l'influence de certains paramètres de broyage dans le processus d'élaboration, on citera à titre d'exemples :

- Vitesse de rotation jarre par rapport à celle du plateau ( $w_v/w_v$ );
- Distance du centre du plateau au centre de la jarre ( $r_d$ ) ;
- Le diamètre de la bille ( $D_b$ ) ;
- Le diamètre de la jarre ( $D_j$ ) ;
- Effets de l'énergie cinétique de choc, de la fréquence de choc et de la puissance de choc.

Dans le dernier chapitre, un programme de calcul a été développé sur la base des paramètres de broyage ( $w_v/w_v, r_d, D_b, D_j$ , etc.) afin de calculer la température de contacts Bille-poudre et Bille-bille durant le broyage ainsi que les vitesses de choc des billes. Ce programme est basé sur la théorie cinématique et thermique, développée précédemment.

**Au vu des résultats obtenus, nous pouvons dégager les principaux points suivants:**

- La distance  $r_d$ (centre du plateau au centre de la jarre) est un critère de choix et de sélection d'un type de broyeur planétaire.

- Plus le rayon de la jarre augmente, plus le rebondissement des billes sera grand et par conséquent la dissipation de l'énergie sera plus importante.
  - Le sens inverse des rotations du plateau et de la jarre ( $w_v/w_d = 2$ ) conduit à une augmentation importante de la vitesse de choc des billes, qui se traduit à un broyage plus intensif et plus efficace des poudres.
    - La température de contact des poudres est proportionnelle au diamètre des billes.
    - La distribution des gradients de température au sein d'une poudre compacte dépend de la conductivité thermique propre de l'alliage considéré (AlTi).

### PERSPECTIVES :

Ce mémoire ne constitue qu'une première étape de l'étude de l'influence de l'aspect thermique en mécanosynthèse. Une optimisation des conditions de broyage est nécessaire pour obtenir des résultats probants. Cette optimisation nécessite en plus de la compréhension des effets de la température, des connaissances de la variation des paramètres de broyage à l'instar de :

- Energie cinétique de choc ;
- Fréquence de choc ;
- Quantité de mouvement des billes;
- Forces de collisions des billes ;
- Puissance de choc, etc.

Une étude paramétrique en fonction des caractéristiques techniques et cinématiques du type de broyeur utilisé.

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS :

- $T$  : Température moyenne de la jarre.  
 $\Delta T$  : Température microscopique.  
 $P$  : Puissance injectée.  
 $f$  : Fréquence de choc de la bille.  
 $m_b$  : Masse de la bille.  
 $m_p$  : Masse de la poudre.  
 $V$  : Vitesse de choc de la bille.  
 $E_0$  : Energie d'impact.  
 $\gamma_a$  : Accélération absolue de la bille.  
 $r_d$  : Distance entre le centre du plateau et le centre de la jarre.  
 $w_v$  : Vitesse de rotation de la jarre.  
 $w_d$  : Vitesse de rotation du plateau.  
 $r_v$  : Rayon de la jarre.  
 $\phi$  : Angle de rotation de la jarre.  
 $\theta$  : Angle de rotation du plateau.  
 $\gamma_1$  : Accélération du plateau.  
 $\gamma_2$  : Accélération de la jarre.  
 $t_1$  : Temps de vol de la bille.  
 $t_2$  : Temps de détachement de la bille .  
 $t_3$  : Temps de collision de la bille.  
 $F_r$  : Force radiale d'impact de la bille.  
 $E$  : Module de Young.  
 $\nu$  : Coefficient de poisson.  
 $P_n$  : Pression radiale.  
 $r_0$  : Rayon de la poudre compacte.  
 $\Delta\tau$  : Durée d'impact de la bille.  
 $F_t$  : Force tangentielle de la bille.  
 $t_0$  : Épaisseur de la poudre compacte supposée un disque.  
 $D$  : Diamètre de la poudre compacte supposée un disque.  
 $U_p$  : Énergie de déformation plastique de la bille.  
 $\psi$  : Coefficient de déformation plastique de la bille.

$T_0$ : Température initiale de la bille.  
 $K$  : Conductivité thermique.  
 $q_1$ : Flux de chaleur par rapport à la bille.  
 $q_2$ : Flux de chaleur par rapport à la poudre.  
 $Q$  : Quantité de chaleur dissipée.  
 $\delta$ : Fraction de chaleur partagée.  
 $\alpha_S$ : Diffusivité thermique de la bille.  
 $K_S$ : Conductivité thermique de la bille.  
 $C_{PS}$ : Chaleur spécifique de la bille.  
 $\rho_S$ : Masse volumique de la bille.  
 $\alpha_C$ : Diffusivité thermique de la poudre.  
 $K_C$  : Conductivité thermique de la poudre.  
 $C_{PC}$ : Chaleur spécifique de la poudre.  
 $\rho_C$ : Masse volumique de la poudre.  
 $F$  : Fraction de surface du joint de grain.  
 $erf$  : Fonction d'erreur.  
 $erfc$  : Fonction d'erreur complémentaire.  
 $ierfc$  : Intégrale de la fonction d'erreur complémentaire.

## **REFERENCES :**

- [1]. I.S. Ahn, S.S. Kim, M.W. Park and K.M. Lee, « Phase characteristics of mechanically alloyed Al-10wt.%Nb alloy », *Journal Materials Science*, vol.19 , pp. 2015-2018, 2000.
- [2]. J. Dutta and H. Hofmann, « *Journal of metastable and nanocrystalline Materials* », vol.23, pp. 27-30, 2005.
- [3]. S.Komarnei, « *Nanocomposites* », *Journal Materials Chemistry*, vol. 2, pp. 1219-1230,1992.
- [4]. S.Bergheul, « *Contribution à l'étude des nanocomposites à base de fer, élaboration et caractérisation* », Thèse de doctorat, université Saad Dahlab, Blida, Algérie, 2006.
- [5]. B.Abeles, P.Sheng, M.D Coutts and Y.Arie, « *Structural and electrical proprieties of granular metal-films*», *Advantage Physics*, vol. 24, pp.407-461, 1975.
- [6]. S. Murali, « *Assembling nanoparticles and biomacromolecules using electrostatic interactions* », *Pure Applications Chemistry*, vol.74, pp.1621-1630, 2002.
- [7]. E.Hellstern, H.J. Fecht, Z. Fu and W.L. Johnson, « *Structural and thermodynamic properties of heavily mechanically deformed Ru and AlRu* », *Journal of Applied Physics*, vol.1, pp.305-310, 1989.
- [08] U. Herr, J. Jing, R. Birringer, U. Gonser and H. Gleiter, *Appl. Phys. Lett.* 50 472 (1987).
- [09]. J.M. Grenèche, J.M.D. Coey, *J The topologically-disordered square lattice: .Phys.* 51, p 231, 1990.
- [10].Tony McNallyPhD, *Nanomaterials in Aerospace Applications*, School of Mechanical& Aerospace Engineering, Italy, 1/10/2010.
- [11]. D. Basset, P. Matteazzi, F. Miani, « *Mécanosynthèse of Nanophase Powders* », *Material Science Engineering*, volume 156, p 53, 1994.
- [12]. Sarah E. O'Donnell, « *Impact of nanomaterials in airframes on commercial aviation. The MITRE Corporation Center for Advanced Aviation System Development*, McLean, Virginia
- [13]. Blue Road Research, Inc, "MNT-based sensors for aircraft/spacecraft structural health monitoring", Concept paper11a, CANEUS, 2006, [www.caneus.org](http://www.caneus.org)

- [14]. 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/>
- [15]. Nanomaterials for Aviation Industry: nanomaterials for aviation. Ptü. Pdf. 10/2011.
- [16]. E. V. G. Eynatten and H. E. Bömmel, Appl. Phys. 14 415 (1977).
- [17]. S. Roth and E. M. Hörl, Phys. Lett. 25A 299 (1967).
- [18]. P.P. Chattopadhyay, I. Manna S. Talapatra, S.K. Pabi, « Milling criteria for the synthesis of nanocrystalline NiAl by mechanical alloying », journal of alloys and compounds , volume 68, pp. 85, 2001.
- [19]. C.C. Koch, in: R.W. Cahn, P. Hassan, E.J. Kramer (Eds.), «Materials Science and Technology», Volume 15, VCH, Weinheim, pp. 192, 1991.
- [20]. D.R Maurice, TH.Courteney, « Development of composite materials by mechanochemical treatment of post-consumer plastic waste », Metallic Transactions, volume 22, p 299, 1990.
- [21]. P. Le Brun, L. Froyen, L. Delaey, «Mechanochemical synthesis of intermetallic compounds», Material Science Engineering, volume 143, p 75, 1992.
- [22]. T.H. Courtney, Mater, « Decomposition of FeSn intermetallic induced by mechanical Milling », Material Transactions. JIM, volume 27, p 124, 1995.
- [23]. N. Burgio, A. Iasonna, M. Magini, S. Martelli, F. Padella, « Different Pathways of Phase Transition in a V–Si System Driven by Mechanical Alloying », Nuovo Cemento, volume 12, p 441, 1991.
- [24]. M. Abdellaoui, E. Gaffet, « X-ray diffraction and Mössbauer studies of mechanically alloyed Fe–Ni nanostructured powders », Acta Metall. Mater., volume 44, p 1087, 1995.
- [25]. E. Gaffet, « Milling conditions effect on structure and magnetic properties of mechanically alloyed Fe–10% Ni and Fe–20% Ni alloys », Material Science Engineering , volume 122 , p181, 1991.
- [26]. E. Gaffet, M. Abdellaoui, N. Malhouroux-Gaffet, « Les nanomatériaux : une caractérisation difficile », Matérial Transactions. JIM, volume 26, p 198, 1995.
- [27]. D. Basset, P. Matteazzi, F. Miani, « Mechanochemical synthesis of Nanophase Powders », Material Science Engineering, volume 156, p 53, 1994.
- [28]. M. Magini, A. Iasonna, «Mechanochemical synthesis of complex oxides», Material Transactions. JIM, volume 26, p122, 1995.

- [29]. A. Iasonna, M. Magini, « Ball milling sound statistical analysis and its relationship with the mechanical work intensity », *Acta Materiala*, volume 45, p 1109, 1996.
- [30]. M. Magini, C. Colella, A. Iasonna, F. Padella, « Effects of rotational direction and rotation-to-revolution speed ratio in planetary ball milling », *Acta Materiala*, volume 46, p 2841, 1998.
- [31]. R. Watanabe, H. Hashimoto, G.G. Lee, « Size dependent magnetic properties », *Material Science Engineering*, volume 156, p 53, 1994.
- [32]. M.P. Dallimore, P.G. McCormick, « Dry mechanochemical synthesis of hydroxyapatites from DCPD and CaO: influence of instrumental parameters on the reaction kinetics », *Material Transactions. JIM* 27, p 1091, 1996.
- [33]. N. Burgio, A. Iasonna, M. Magini, S. Martelli, F. Padella, *Il Nuovo Cemento* 13D (1991) 459.
- [34]. M.P. Dallimore, P.G. McCormick, *Mater. Trans. Jim* 37 (1996) 1091.
- [35]. P. Le Brun, L. Froyen, L. Delaey, *Mater. Sci. Eng. A* 161 (1993) 75.
- [36]. K.L. Johnson, in: *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [37]. M. Abdellaoui, E. Gaffet, *J. Alloys and compound*, 209, (1994) 351.
- [38]. M. Abdellaoui, E. Gaffet *Acta Metallurgica et Materialia* 43, (1995) 1087.
- [39]. H. M. Rietveld, *J. Appl. Cryst.* 2 (1969) 65.
- [40]. L. Lutterotti, R. Campostrini, R. Di Maggio, Stefano Gialanella, *Metastable Mechanically Alloyed and Nanocrystalline Materials*, (1 and 2) (2000), 343, 657.
- [41]. S. Veintemillas-Verdaguer, M. P. Morales, C. J. Serna, *Appl. Organometal. Chem.* 15 (2001), 365.
- [42]. U. Herr, J. Jing, R. Birringer, U. Gonser, H. Gleiter, *Appl. Phys. Lett.* 50 (1987) 472.
- [43]. C. Janot, *Collection de Monographies de Physique*, Masson, Paris (1972).
- [44]. S. Morup, G. J. Long, *Plenum Press*, New York, 2 (1987)
- [45]. Dominique Marchio, Paul Reboux, *Introduction Aux Transferts Thermiques*, Les Cours - École des mines de Paris, Presses des MINES, 210 pages, 2008
- [46]. A.K. Bhattacharya et E. Arzt, « temperature rise during mechanical alloying », *scripta Metallurgica and Materialia*, Volume 27, pp. 749-754, 1992.
- [47]. C. Suryanarayana, « Mechanical alloying and milling », *Progress in Materials Science*, volume 46, pp. 1-184, 2001.



- [48]. D.A porter and K.E Easterling, « phase transformation in Metals and Alloys», Vannstrand Reinhold (UK), pp. 66-68, 1980.
- [49]. JR HARRIS, JAD Wattis et JV BOIS, «Une comparaison de différents modèles pour *alliage mécanique* », *Acta materiala*, volume 6 , pp . 6491-6503, 2000.
- [50]. Swati M. Umbrajkar, Mirko Schoenitz, Steven R. Jones, Edward L. Dreizin, « Effect of temperature on synthesis and properties of aluminium », *Journal of Alloys and compounds*, volume 402, pp.70–77, 2005.
- [51]. Chattopadhyay a, I. Manna, S. Talapatra b, S.K. Pabi a; *Materials Chemistry and Physics* 68 (2001) 85-94.
- [52]. E.A.Brandes and G.B. Brook, « *Smithells Light Metals Handbook* », Butterworth Heinemann, pp. 5, England, 1998. 2) M.F. Ashby and D.R.H. Jones, « An introduction to microstructures, processing and design », *Engineering Materials* 2, pp.12-13, Department of Engineering, Cambridge University, England, 1999.