

MEMOIRE

Présenté par

Sarra KHILOUF

Pour l'obtention de diplôme de

MASTER

Filière : Physique

Spécialité : Physique Des Matériaux

Thème

**CARACTERISATION DES EMPILEMENTS ALEATOIRES DENSES DES POUDRES
METALLIQUES**

Soutenue le : 08/07/2019

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Université	Qualité
GUENFOUD Fatma	MCB	Univ. d'El Tarf	Présidente
REDOUANI Locif	MCB	Univ. d'El Tarf	Rapporteur
TOUAM Selma	MCB	Univ. d'El Tarf	Examinatrice

Année Universitaire : 2018/2019



Remerciements

En tout premier lieu, je remercie Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Toute ma gratitude à mon encadrant **Mr. REDOUANI Locif** qui, malgré son occupation, s'est montré toujours disponible et réactif à toutes mes questions. Je le remercie pour son aide à effectuer ce travail. Ce fut un réel plaisir de travailler avec lui.*

Je tiens à remercier mes parents pour leurs efforts et leurs sacrifices pour mon éducation.

*Je tiens également à remercier **Mme GUENFOUD Fatma** pour avoir accepté de présider le jury de soutenance et **Mme TOUAM Selma** pour avoir accepté d'examiner mon travail.*

Je n'oublie pas d'exprimer mes profonds remerciements à tous les professeurs qui m'ont accompagné pendant tout mon cursus.

Je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, pour réaliser ce mémoire.





Dédicaces

C'est avec tous l'ardeur de mes sentiments que je dédie ce mémoire à :

Mon père Abdelkrim et ma mère Sabah.

Mes chères sœur Hadjer et Ichraq et mes frères Zaid et Ahmed.

Toute ma famille notamment Khaltita. Mes cousines : Hadoula, Amira, Sali, Bouchera et la coutcout Djana. Mes cousins : Hani, Aymen, Housseem et Nadir.

Mes grand-mères et grand pères.

Ma belle sœur et mon intime Lamis.

Les adorables de la promotion master 2 physique : Sarra, Soumia, Houda, Manel, les deux Marwa, Imen, Bouchera et Rima.

Toutes mes amies de mon cursus universitaire.

Mes sœurs de la mosquée.

Mes amis sur facebook, Salima, Ikram et ma belle Soudjoud.

Mes frères d'étude A.A et A.B.

Tous mes enseignants.

Mes étudiants, spécialement Islam.

Toute personne qui m'a encouragé et m'a toujours souhaité le meilleur.



TABLE DES MATIERES

Remerciements

Dédicaces

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I : GENERALITES

I.1. INTRODUCTION..... 2

I.2. LA METALLURGIE DES POUDRES.....2

I.3. MECANISMES DE DENSIFICATION DES POUDRES.....4

I.3.1. Lors du remplissage des matrices.....4

I.3.2. Pendant la mise en forme..... 4

I.3.3. Au cours du frittage en phase solide.....6

I.3.4. Au cours du frittage en phase liquide.....8

I.3.5. Au cours de la compression isostatique à chaud 10

I.4. PARAMETRES INFLUANCANT LA DENSIFICATION..... 11

I.5. EMPILEMENT ALEATOIRE DENSE (EAD).....14

I.5.1. Définition..... 14

I.5.2. Application..... 15

CHAPITRE II : MODELISATION DES EMPILEMENTS ALEATOIRES DENSES

II.1. INTRODUCTION.....16

II.2. DENSITE RELATIVE..... 16

II.3. DISTRUBITION RADIALE CUMULEE.....17

II.4. DENSIFICATION DES EAD.....18

II.5.	STADES DE DENSIFICATION.....	20
II.6.	PARAMETRES DES EAD.....	21
II.6.1.	Nombre de coordination.....	21
II.6.2.	Surface moyenne de contact.....	23
II.6.3.	Pression efficace.....	25
II.7.	CONCLUSION.....	26

CHAPITRE III : EMPILEMENT ALEATOIRE DENSE DE PARTICULES
BIDIMENSIONNELLES

III.1.	INTRODUCTION.....	27
III.2.	DENSIFICATION DES EAD.....	27
III.2.1.	Nombre de coordination.....	27
III.2.2.	Surface moyenne de contact.....	29
III.2.3.	Pression efficace.....	33
III.3.	RESULTAT ET DISCUSSION.....	34
III.3.1.	Nombre de coordination.....	34
III.3.2.	Surface moyenne de contact.....	35
III.3.3.	Pression efficace.....	37
III.4.	CONCLUSION.....	38

	CONCLUSION GENERALE.....	40
--	--------------------------	----

	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	41
--	----------------------------------	----

Résumé

INTRODUCTION

Une grande partie des objets qu'on utilise dans notre vie courante est fabriquée à partir des poudres. La fabrication et la mise en forme de ces poudres sont régies par plusieurs mécanismes. Parmi ces mécanismes, ceux qui provoquent des modifications morphologiques de la porosité et des particules de poudres qui influent considérablement le processus de densification.

Pour simplifier l'étude de la densification des agrégats de poudres et l'évaluation de leurs paramètres (nombre de coordination, surface de contact et pression efficace), les agrégats sont assimilés à des empilements aléatoires denses (EAD) de particules sphériques.

Beaucoup de travaux ont été réalisés à ce sujet en se basant sur les EAD de particules sphériques monodimensionnelles, où l'évaluation de ces paramètres est divisé en deux parties en fonction de la densité relative D : stade I où D est compris entre 0,64 et 0,92 et la deuxième partie (stade II) dont la densité relative prend les valeurs de 0,92 à 1.

Il est démontré dans plusieurs cas que la taille des particules influe amplement sur les paramètres des EAD. Ainsi, notre travail consiste à considérer un EAD de particules sphériques de deux dimensions. On va donc développer de nouvelles équations qui permettent d'évaluer le nombre de coordination (Z), la surface de contact (a) et la pression efficace (P_{eff}) en fonction de la densité relative, en tenant compte des changements morphologiques des particules de poudres pendant la densification.

Ce manuscrit comporte trois chapitres. Le premier est destiné à des généralités sur les poudres métalliques, la métallurgie des poudres et les mécanismes de densification qui interviennent lors de remplissage des matrices et de mise en forme, les paramètres influençant la densification (la morphologie des grains, la taille des particules, la distribution granulométrique des particules, etc.) ainsi que les EAD et leurs applications.

Dans le deuxième chapitre, nous allons exposer les travaux de modélisation des EAD des poudres sphériques de même dimension ainsi que les études réalisées pour évaluer leurs paramètres en fonction de la densité relative.

Enfin, le dernier chapitre est réservé à la présentation de notre approche qui consiste à considérer des poudres sphériques de deux dimensions. Ce chapitre est divisé en deux parties. Dans la première, nous allons développer les calculs qui ont permis d'aboutir à des équations des paramètres des EAD de particules bidimensionnelles en fonction de la densité relative et la deuxième est réservée à la présentation des résultats ainsi que leurs discussions.

CHAPITRE I :

GENERALTES

I.1. INTRODUCTION

Nombre de produits sont, de nos jours, fabriqués sous formes de poudres : pigments, encres, vernis, catalyseurs, explosifs, produits chimiques, détergents, engrais, produits agro-alimentaires, produits pharmaceutiques, produits d'hygiène, ciments, etc. En outre, presque toutes les classes de matériaux industriels (métaux, céramiques, plastiques sont concernées par la production et le traitement de poudres (Bouvard, 2002).

Les poudres métalliques ont fait l'objet d'une révolution industrielle ces dernières décennies. En effet, la plus part des pièces de construction mécanique, notamment celle de la mécanique de pointe (automobile, aéronautique, navale, outillage, médecine, etc.) sont produites à partir de poudres. Cependant, les techniques utilisées pour l'obtention de ces poudres ou leur densification, qui sont regroupée par la discipline de métallurgie des poudres (MDP), sont soumises continuellement à des améliorations.

Plusieurs paramètres entrent en jeu dans la densification des poudres (distribution de la taille des grains, leurs formes, ...) et sont difficilement maîtrisables.

Dans ce chapitre, nous allons décrire d'une manière succincte les agrégats de poudres, quelques mécanismes mis en jeu lors de leur densification ainsi que les paramètres qui peuvent influencer les processus de mise en forme. Nous allons présenter, enfin, une description générale des empilements aléatoires denses (EAD) de particules sphériques.

I.2. METALLURGIE DES POUDRES

La métallurgie des poudres (MDP) rassemble toutes les méthodes de fabrication, de mise en forme et de densification des poudres. Le principe de la MDP, décrit dans la Fig. I.1, contient essentiellement 03 étapes successives :

- l'élaboration de la poudre ;
- la mise en forme pour donner une certaine cohésion à l'agrégat de poudre pour permettre sa manipulation ;
- la densification du comprimé pour l'obtention du produit final.

Dans certain cas, il est nécessaire d'ajouter certaines opérations secondaires, tel que l'usinage pour la finition de la pièce et, quand il s'agit de frittage contraint (sous charge), on peut s'en passer des techniques de mise en forme à froid.

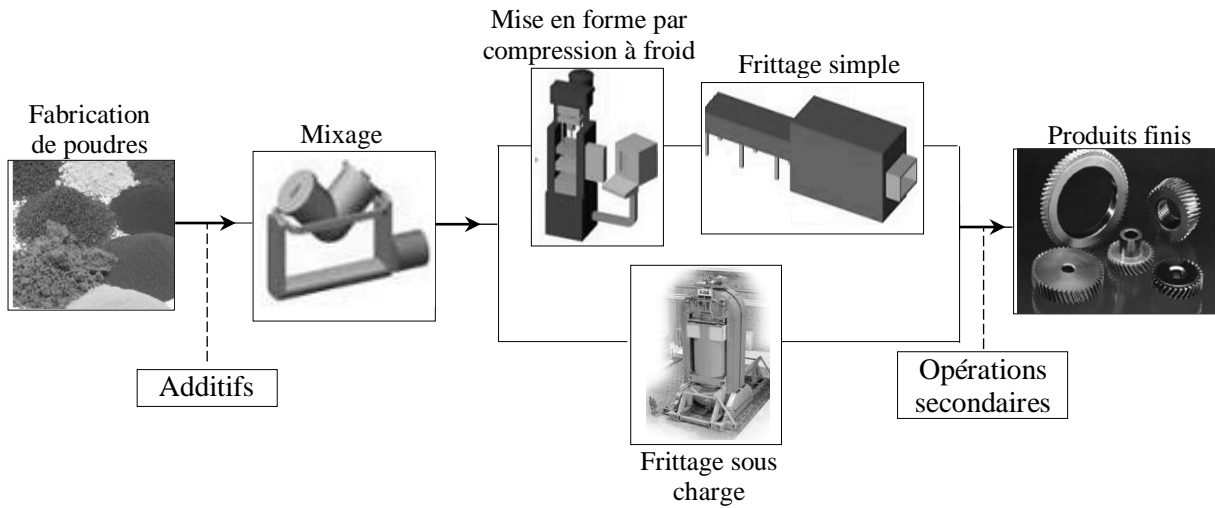


Fig. I.1. Etapes de fabrication de pièces par les techniques de la métallurgie des poudres (Redouani, 2013).

Les méthodes essentielles de la MDP sont regroupées dans des catégories tel que démontré par la Fig. I.2.

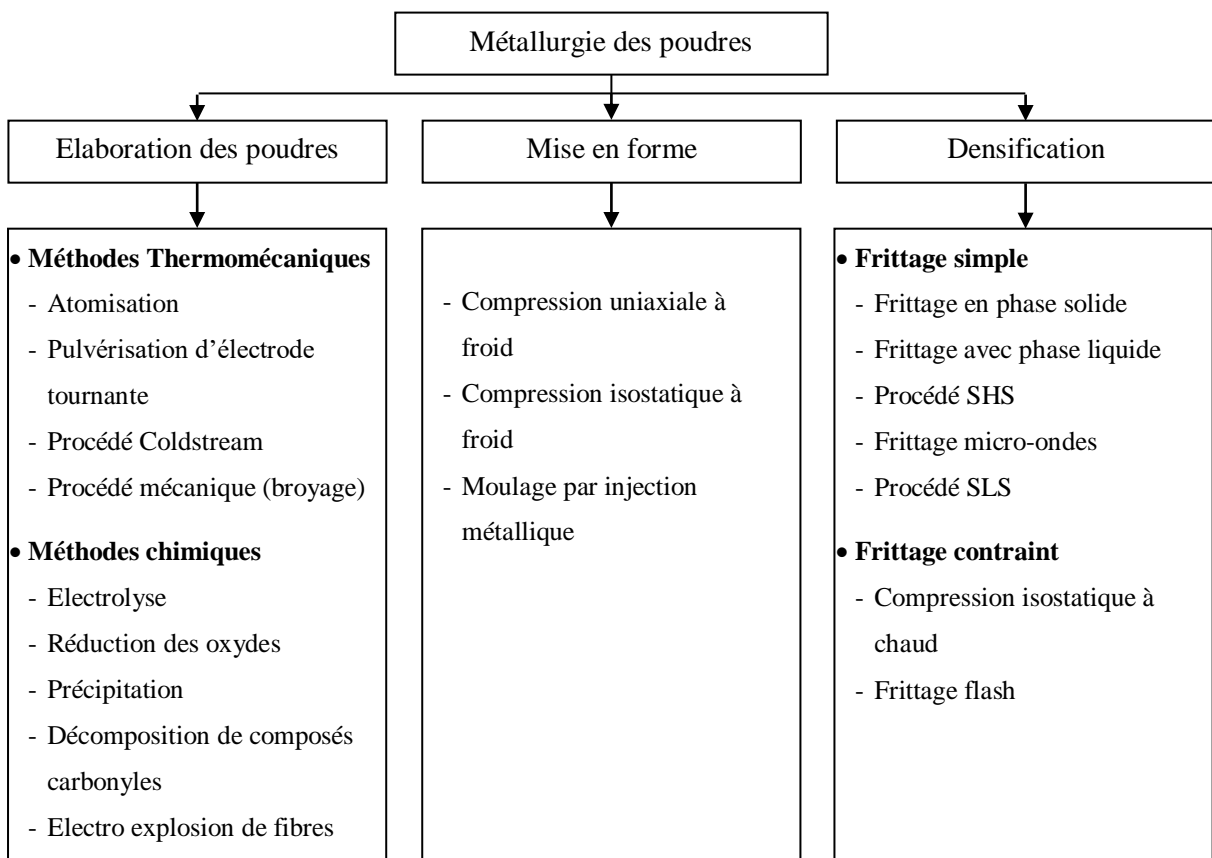


Fig. I.2. Techniques de la métallurgie des poudres par catégories.

La réduction des coûts de production, la possibilité de mieux contrôler la microstructure, la précision dimensionnelle des pièces et la combinaison de propriétés spécifiques sont les

principaux avantages offerts par la métallurgie de poudres (Olmos Navarrete, 2009). Le tableau I.1 présente quelques exemples typiques d'applications pour des compositions de poudres variées.

Tab. I.1. Exemples de liaisons entre les matériaux et leurs applications (Frachon, 2002).

Matériaux	Applications
Aluminium	Allégement des structures
Acier	Transmission mécanique
Hexaferrite de strontium	Aimant permanent
Carbure de tungstène	Outil de coupe
Titanate	diélectrique pour les condensateurs
Argent	Supraconducteurs électriques
Oxyde d'uranium	Crayons pour les centrales nucléaires

I.3. MECANISMES DE DENSIFICATION DES POUDRES

Plusieurs mécanismes sont responsables de la densification des agrégats de poudres métalliques. Ces mécanismes diffèrent d'une technique de densification à une autre, d'une étape à une autre pendant le processus de la MDP, etc.

Dans ce qui suit, nous allons essayer de donner un aperçu sur ces différents mécanismes.

I.3.1. Lors du remplissage des matrices

Lors de remplissage des matrices (Fig. I.3), le mécanisme qui permet d'augmenter la densité de l'agrégat de poudre est le réarrangement mutuel des particules. Celui-ci conduit à la formation d'empilements denses. Ce mécanisme dépend évidemment de plusieurs facteurs, on peut citer entre autres :

- la coulabilité de la poudre ;
- la nature des adjuvants et lubrifiants ;
- la forme des particules, etc.

I.3.2. Pendant la mise en forme

La mise en forme des poudres pour obtenir des comprimés facilement manipulables sont obtenus le plus souvent par compression (uniaxiale ou hydrostatique) ou bien par moulage (par injection métallique).

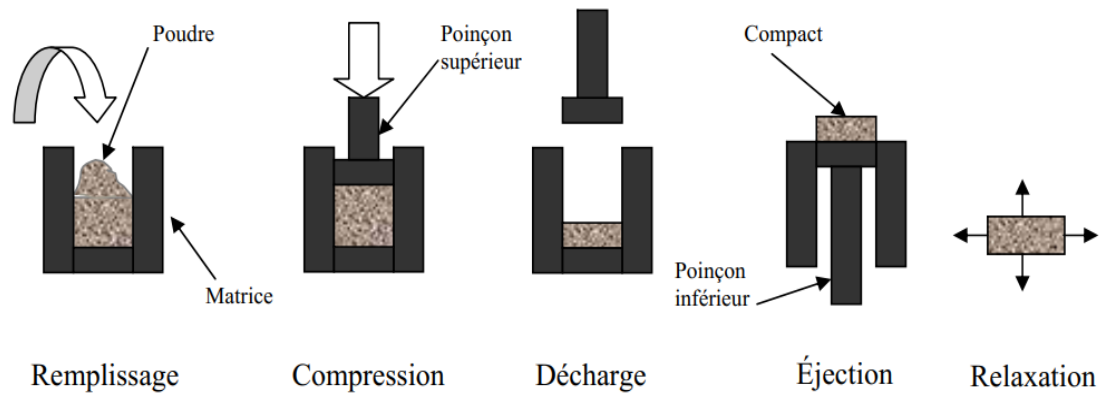


Fig. I.3. Présentation du procédé de compression en matrice (Kadiri, 2004).

Lorsque la poudre est comprimée à froid, plusieurs phénomènes (Fig. I.4) peuvent être considérés (Redouani, 2013 ; Eudier, 1994) :

- Après réarrangement des particules, la pression appliquée provoque une déformation plastique graduelle des particules en contact. La densification finale s'effectue par écoulement plastique dans les ensembles des grains qui forment l'empilement obtenu.
- La cohésion mécanique du comprimé qui résulte en grande partie d'une véritable soudure à froid des grains de poudre qui sont amenés en contacts locaux suffisamment intimes pour que puissent s'établir des liaisons entre leurs atomes superficiels.
- La cohésion du comprimé peut être également obtenue par l'abrasion des surfaces de contact entre particules, l'imbrication mécanique des particules entre elles ou à partir d'échauffements locaux de très courte durée qui provoquent des soudures à chaud.

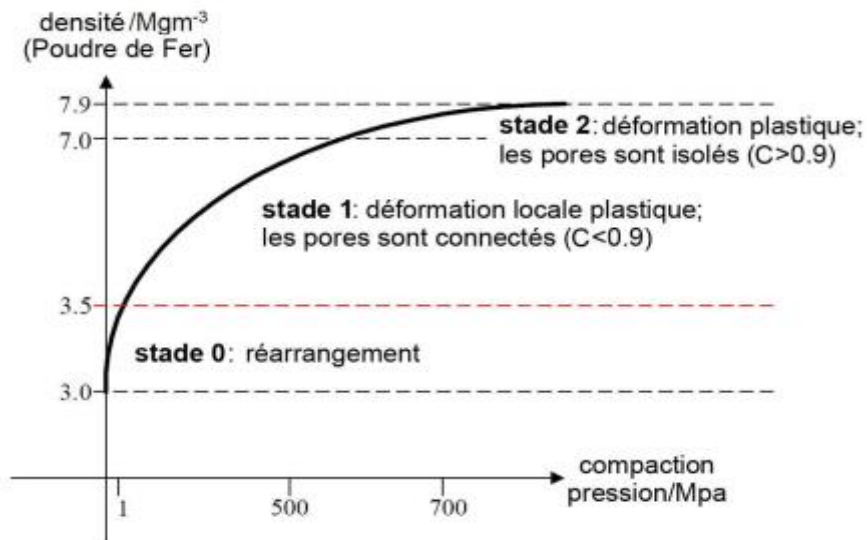


Fig. I.4. Vue schématique des trois stades de la phase de la compression pour une poudre de fer (Jerier, 2009).

I.3.3. Au cours du frittage en phase solide

Le frittage est un traitement thermique effectué à une température au dessous du point de fusion du composant principal du matériau qui permet la génération de liaisons fortes entre les particules par diffusion de matière. Industriellement, le frittage en phase solide est le plus utilisé, surtout pour la Fabrication de pièces métalliques, car le changement de dimensions est faible (Olmos Navarrete, 2009).

Au début du frittage, on constate une croissance rapide des ponts (cous) entre les particules par déplacement d'atomes, on parle de diffusion (transport) de matière à l'état solide (voir Fig. I.5 et Tab. I.2). Puis, les grains prennent une forme polyédrique et les pores leur forme d'équilibre le long des arêtes des grains (Fig. I.6). On considère alors que la densification intervient par réduction de la section des canaux poreux situés le long des joints de grains. Ce qui provoque la fermeture de la porosité (les pores sont isolés). En général, on considère que les pores, une fois isolés, rétrécissent et continuent jusqu'à leur disparition plus au moins complète (Haussonne et al., 2005 ; Olmos Navarrete, 2009).

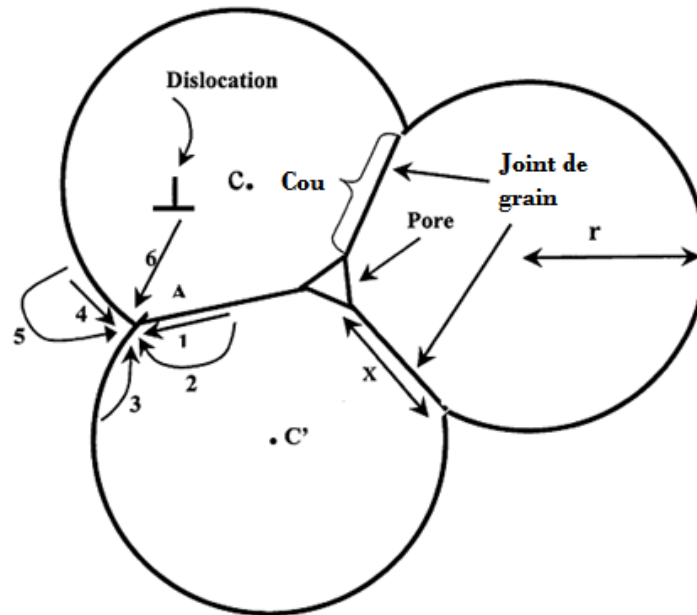


Fig. I.5. Chemins de transport de matière lors de la croissance du cou au cours du frittage (Le tableau I.2 donne les chemins de transport auxquels les chiffres correspondent). C et C' sont les centres des particules, x le diamètre du cou et r le rayon des particules (Atkinson et Davies, 2000).

Tab. I.2. Chemins et sources de transport de matière par diffusion et en phase vapeur lors du frittage (l'évier dans chaque cas est le cou) (Atkinson et Davies, 2000).

Mécanisme	Type de transport	Source de matière
1	Diffusion dans les joints de grains	Joint de grains
2	Diffusion en volume	Joint de grains
3	Diffusion en volume	Surface
4	Diffusion en surface	Surface
5	Transport en phase vapeur	Surface
6	Diffusion en volume	Dislocations

On suppose que six mécanismes distincts contribuent au frittage d'un agrégat de poudres. Cependant, deux d'entre eux seulement sont densifiant. Il s'agit de la diffusion intergranulaire (Mécanisme 1) et de la diffusion en volume à partir des joints de grain (Mécanisme 2).

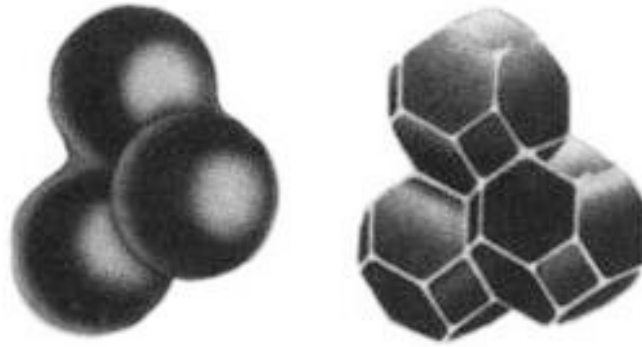


Fig. I. 6. Croissance des ponts entre particules et forme polyédriques des grains de poudre lors du frittage en phase solide (Haussonne at al., 2005).

I.3.4. Au cours du frittage avec phase liquide

On parle de frittage avec phase liquide (*Liquid Phase Sintering*) lorsque, pendant la consolidation ou la densification du compact, une partie de la matière atteint son point de fusion (Louet, 2003). Il intervient lorsque l'on mélange un constituant de base majoritaire avec un additif à bas point de fusion (Bouvard, 2002).

La Fig. I.7 représente les étapes classiques par lesquelles peut passer un mélange de poudres durant le frittage avec phase liquide.

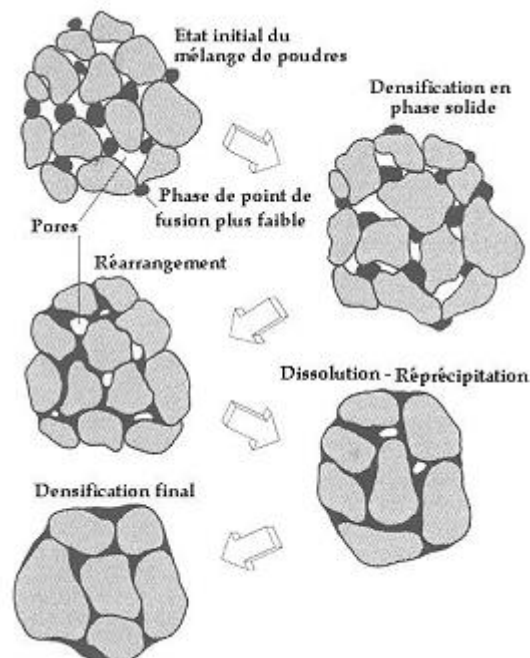


Fig. I.7. Etapes classiques durant le frittage avec phase liquide du mélange de poudres (German, 1996).

La Fig. I.8 représente la cinétique de frittage en présence d'une phase liquide. Elle met en évidence les trois mécanismes qui peuvent régir la densification.

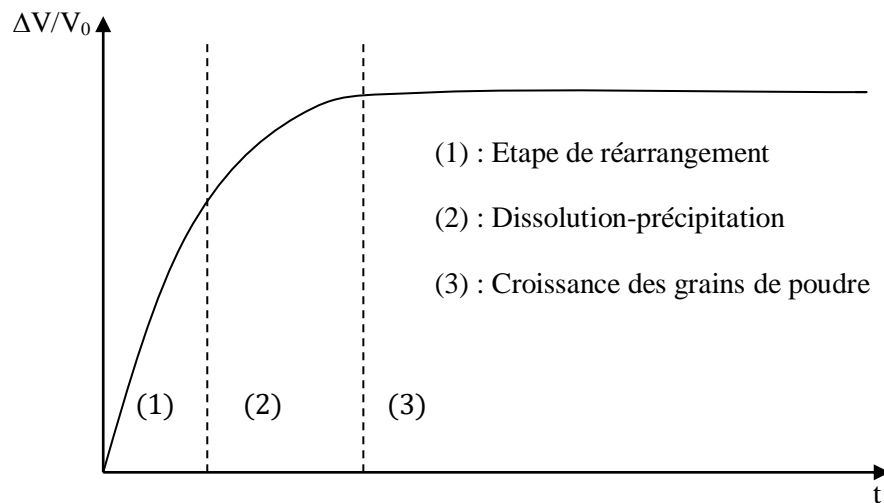


Fig. I.8. Cinétique de frittage avec phase liquide (Azem, 2005).

- **Réarrangement** : Lorsque la fusion se produit, on observe un retrait important dans un temps court (de l'ordre de la minute) qui est dû aux réarrangements des particules les unes par rapport aux autres. L'efficacité de la densification induite par le réarrangement dépendra notamment de la fraction volumique de liquide dans le compact et de sa mouillabilité (Louet, 2003).
- **Dissolution-précipitation** : Lorsque le réarrangement des particules est terminé, si la phase liquide n'est pas suffisante pour combler la porosité, celle-ci peut ensuite provoquer une nouvelle densification à condition que le solide soit soluble. Le liquide qui met en compression les points de contact entre les grains via des forces capillaires, permettra d'augmenter localement la solubilité du solide dans le liquide. Cette dissolution dans le liquide suivie de re-précipitation sur les surfaces libres, conduit à un rapprochement des grains et donc à une nouvelle densification. Le paramètre le plus important de cette étape est sans aucun doute la solubilité du solide dans la phase liquide (Louet, 2003).
- **Grossissement des grains** : Le frittage en phase liquide s'accompagne d'un grossissement des grains dû à la dissolution des petites particules et à leur précipitation sur les plus grosses. Dans la majorité des cas, le liquide se comporte comme une impureté qui ralentit la migration des joints (croissance contrôlée par la diffusion entre les grains). En fin de densification, quand l'essentiel de la

porosité a disparu, la microstructure du comprimé peut encore subir une évolution importante du fait de l'intervention de cette coalescence.

Lorsque la solubilité du liquide dans le solide qui précipite est suffisamment importante pour que la phase liquide disparaisse totalement au cours du frittage, le grossissement des grains (et éventuellement la fin de la densification) est alors régi par les mêmes mécanismes que le frittage en phase solide (Bernache-Assollant et Bonnet, 2005).

I.3.5. Au cours de la compression isostatique à chaud

Dans ce cas, l'agrégat de poudre est soumis simultanément à une température de frittage et une pression hydrostatique très élevée. La densification est assurée par les atomes du gaz pressurisé qui entrent en collision avec la surface de l'échantillon comme cela est schématisé par la Fig. I.9.

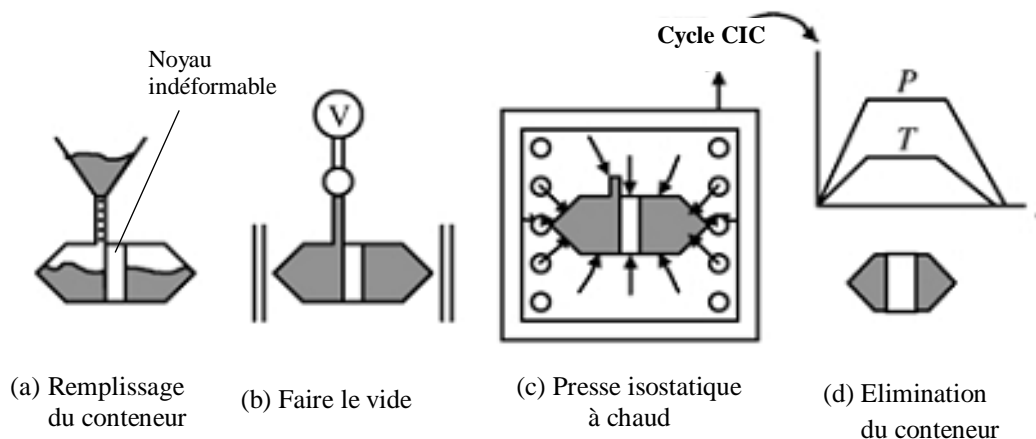


Fig. I.9. Illustration de la CIC d'un échantillon de poudre (Konak et al., 2003).

Sous l'effet de la pression et de la température, les pores et les défauts de l'échantillon à traiter se déforment et s'éliminent en se déplaçant vers la surface. Plusieurs mécanismes sont alors activés (Swinkels et al., 1983 ; Helle et al., 1985) :

- **La déformation plastique :** la pression appliquée à la poudre provoque une amplification de la pression effective (P_{eff}) exercée sur les contacts entre particules. Ces contacts subissent alors une déformation plastique sous réserve que le critère de plasticité suivant est vérifié :

$$P_{\text{eff}} \geq 3\sigma_y \quad (\text{I.1})$$

avec σ_y la limite élastique du matériau de base de la poudre.

- **La fluage en loi de puissance** : des zones de fluages apparaissent au niveau des contacts sous l'effet de la température et de la pression. Ce mécanisme est régi par la loi de puissance suivante :

$$\dot{\epsilon} \geq A\sigma^n \quad (I.2)$$

où $\dot{\epsilon}$ et σ sont respectivement la vitesse de déformation et la contrainte appliquée, A et n des constantes des matériaux de base des poudres.

- **La diffusion** : les mécanismes de diffusion susceptibles d'être activés au cours du processus de densification de poudre par CIC sont les mêmes que ceux activés lors de frittage en phase solide.
- **Écoulement diffusif** : appelé également fluage de Nabarro-Herring et Coble. C'est un autre mécanisme qui peut conduire à la densification des poudres ductiles. En effet, il n'est pris en compte que si les dimensions des grains cristallographiques sont très faibles devant celle des particules de poudres ($R \gg \bar{G}$). Cette condition n'est pas vérifiée dans le cas des matériaux durs.

I.4. PARAMETRE INFLUENÇANT LA DENSIFICATION

La densification d'un agrégat de poudre est un phénomène très complexe. Elle dépend de plusieurs facteurs. On peut citer entre autres :

- **La morphologie des grains** : cette information complète la description morphologique du mélange. Elle conditionne en partie le comportement de la poudre pour certaines phases du frittage.

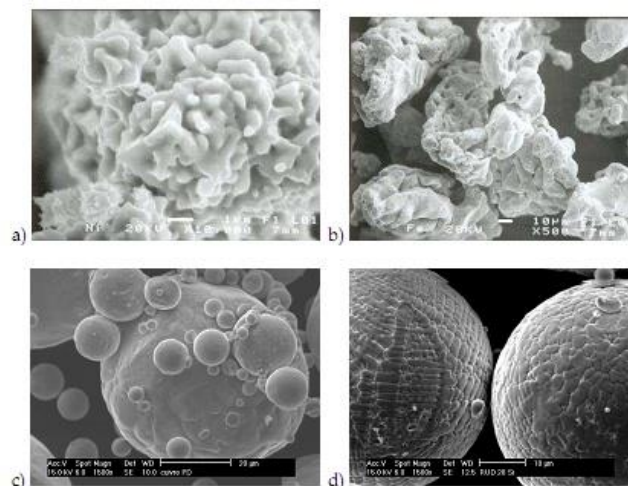


Fig. I.10. Morphologies de différents types de poudres métalliques obtenues avec un microscope électronique à balayage (Olmos Navarrete, 2009).

Les poudres se présentent sous différentes formes, soit avant ou au cours de la densification (Fig. I.11).

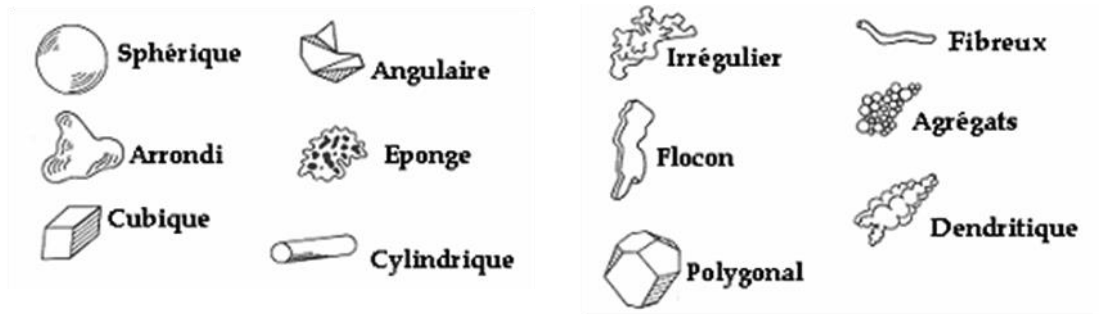


Fig. I.11. Morphologie des particules (Olmos Navarrete, 2009).

- **La taille des particules** : La taille des particules est une caractéristique très importante qui dictera le comportement au frittage et les propriétés finales de la pièce; par exemple les particules plus petites, de plus grande surface spécifique, produisent une force motrice de frittage plus élevée et donc les temps et températures de frittage nécessaires pour arriver à une densification complète sont plus faibles (Olmos Navarrete, 2009).

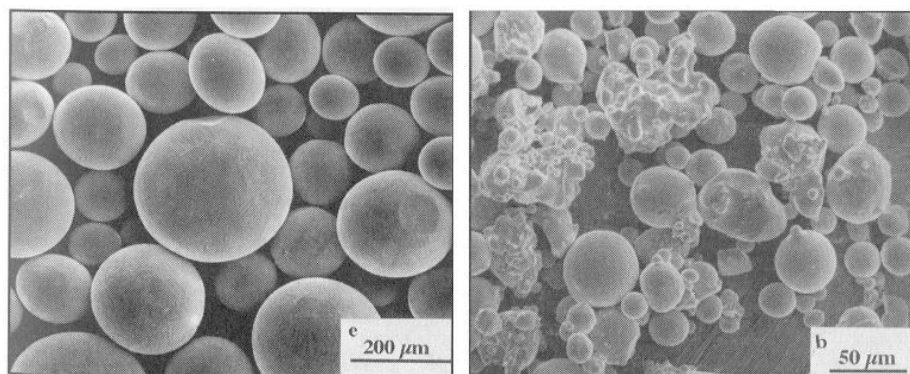


Fig. I.12. Des exemples de diverses tailles de grains de poudres métalliques (Frachon, 2002).

- **La distribution granulométrique des particules** : des études expérimentales montrent que, pour une taille moyenne de grains fixe et pour une densité initiale identique, lorsque l'on augmente l'écart type de la distribution de taille, la vitesse de densification est plus rapide en début de frittage, mais la densité finale n'est pas plus grande, voire même plutôt faible (Bouvard, 2002).

La taille des particules (rayon R) intervient dans les différentes lois d'avancement du frittage que ce soit pour la croissance des ponts, le retrait ou la diminution de la porosité lors de la dernière étape du frittage. De façon générale, les temps t_1 et t_2 mis

pour atteindre un même avancement du frittage avec deux tailles de particules R_1 et R_2 sont reliés par la relation (Haussonne et al., 2005) :

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^m \quad (\text{I.3})$$

où m est une constante.

- **Le matériau constitutif des grains :** Les caractéristiques de la poudre jouent un rôle important dans le processus de fabrication des pièces solide par métallurgie des poudres et déterminent en partie leurs propriétés finales (Olmos Navarrete, 2009). Si on considère par exemple la caractéristique mécanique de dureté, elle conduit à définir deux grandes classes de matériaux (Frachon, 2002) :

- Les matériaux ductiles tels que le fer, le cuivre ou encore le plomb, pour lesquels la densification a lieu pour l'essentiel pendant la phase de compression. En effet, les grains vont se déformer grandement au cours de cette phase.
- Les matériaux fragiles tels que les carbures et les céramiques. Une partie de la densification se fait pendant la compression et une autre partie, presque équivalente, est faite pendant le frittage. En effet, pendant cette dernière phase, le retrait peut atteindre jusqu'à 20%.

- **La quantité de lubrifiant utilisée :** le rôle du lubrifiant est d'abord de limiter les frottements, principalement ceux entre la poudre et l'outillage et ceux entre les grains de poudre eux-mêmes.

Le lubrifiant n'a cependant pas qu'un rôle positif dans l'ensemble du procédé. Il présente l'inconvénient de limiter la densification sous forte charge, de laisser des vides lors de son élimination au frittage. Un lubrifiant sera donc toujours employé à faible pourcentage afin d'obtenir un compromis entre le fonctionnement correct des équipements et de bonnes caractéristiques mécaniques des pièces comprimées, comme illustrées dans la Fig. I.13 (Bouvard, 2002).

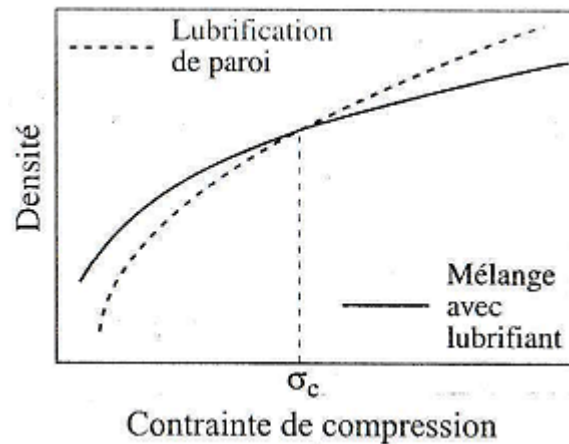


Fig. 13. Influence du lubrifiant sur l'évolution de la densité au cours d'une compression (Bouvard, 2002).

I.5. EMPILEMENT ALEATOIRE DENSE

I.5.1. Définition

La densité verte est définie comme la densité d'un corps en poudre, mis en forme par compactage ou par coulage en barbotine, pour une application des corps crus. Les mécanismes sous-jacents du pressage restent, aujourd'hui encore, mal compris et leur modélisation par une simple équation physique s'avère impossible : de trop nombreux paramètres entrent en jeu et l'évaluation de leur importance relative reste difficile. Il est désormais connu que l'empilement joue un rôle prépondérant dans la qualité d'un corps cru, et notamment dans sa tenue mécanique et sa capacité de densification. Ainsi, pour obtenir une densité maximale, les empilements les plus denses sont privilégiés. Dans le cas d'une poudre sphérique monotallée, deux situations existent (Guerin, 2004) :

- La poudre est simplement versée dans un contenant sans agitation ni vibration: l'empilement, appelé empilement libre aléatoire (ou Random Loose Packing RLP), a une densité relative proche de 54% (porosité relative proche de 46%). Il représente la plus faible densité d'empilement stable obtenu sans ordre à longue distance ni déformation. Cette densité est analogue à la densité apparente.

- La poudre est versée dans un conteneur qui est soumis à une vibration jusqu'à ce que l'empilement soit stable. La densité relative de cet empilement, appelé empilement aléatoire dense (EAD ou Random Close Packing RCP), est voisine de 64% (porosité relative de 36%),

analogue à la densité tassée. Cet empilement est le plus compact possible obtenu sans ordre à longue distance ni déformation.

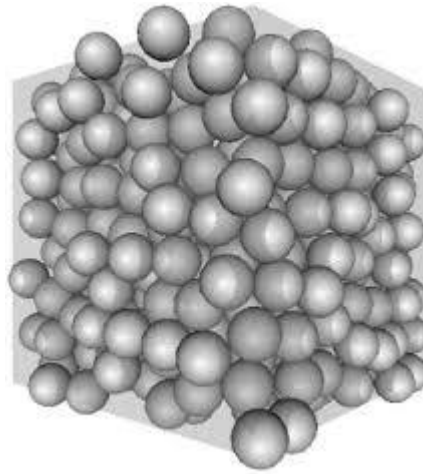


Fig. I.14. Vue à 3D d'un empilement aléatoire dense de sphères (Vandewalle, 2018).

I.5.2. Application

Les applications des EAD sont très nombreuses. On peut citer :

- Par exemple les problèmes semblables à celui de Newton interviennent dans l'étude des agrégats, qui sont des arrangements compacts d'une dizaine ou d'une centaine de corpuscules (atomes, molécules, ...).
- D'autres retombées concernent les codes correcteurs utilisés pour supprimer les erreurs commises par les lecteurs de disques compacts ou encore les erreurs causées par des perturbations dans les réseaux de transmission de données numériques.
- La théorie des empilements de sphères possède aussi des applications à l'intérieur des mathématiques, puisqu'elle est reliée à la fois à la théorie des nombres et à la théorie des groupes (P. Baumann, 2000).
- En métallurgie des poudres, les EAD sont utilisés dans l'étude des agrégats de poudres. En effet, la complexité des phénomènes liés à la densification des poudres nécessitent des systèmes modèles qui permettent de simplifier la variation de la morphologie et de la densité au cours du compactage et du frittage. C'est pourquoi on assimile les agrégats de poudres à des empilements aléatoires de particules sphériques.

CHAPITRE II :

**MODELISATION DES EMPILEMENTS
ALEATOIRES DENSES**

II.1. INTRODUCTION

Les agrégats de poudre se présentent sous forme d'empilements aléatoires de particules très complexes à étudier dans leur configuration initiale. Les raisons de cette complexité résident dans la nature polydispersée des particules de poudre et le caractère désordonné de leur empilement. Parmi les caractéristiques principales des agrégats de poudre, la composition granulométrique et la densité apparente revêtent une grande importance. En effet, ces deux paramètres conditionnent largement le choix du procédé de densification à mettre en œuvre pour conférer au produit final des propriétés mécaniques et physiques performantes.

La composition granulométrique renseigne sur la distribution des particules en fonction de leur taille. La densité apparente donne la masse par unité de volume de la poudre versée directement dans un container sans procéder à sa vibration. L'empilement obtenu dans ce cas est dit lâche. Quand le remplissage du container est réalisé avec vibration, on obtient un empilement aléatoire dense (EAD) avec une densité à vert supérieure à la densité apparente. Pour caractériser un EAD, on utilise la densité relative D qui est le rapport entre sa densité à vert et la densité du matériau massif (Cheng et al., 2000 ; He et Ekere, 1998).

Dans ce chapitre, nous allons présenter un aperçu, plus au moins détaillé, sur la modélisation des empilements aléatoires denses de particules sphériques de même dimension. Ainsi, il y a lieu d'évaluer les paramètres des EAD (nombre de coordination, surface de contact entre particules et pression efficace) en fonction de la densité relative. Ce travail, initié par E. Arzt (Arzt, 1982), est adopté et développé par plusieurs auteurs, notamment Ashby et ses collaborateurs (Arzt et al., 1983 ; Swinkels et al., 1983 ; Helle et al., 1985) ainsi que Redouani et ses collaborateurs (Redouani et Boudrahem, 2012 ; Redouani et Boudrahem, 2015 ; Redouani et al., 2019), afin de modéliser le processus de densification des poudres métalliques et céramiques par la compression isostatique à chaud (CIC) en utilisant une approche micromécanique.

II.2. DENSITE RELATIVE

La densité relative D est une grandeur très importante dans la caractérisation des EAD. Elle est définie comme étant le rapport entre la densité réelle ou à vert (d_r) de l'agrégat de poudre et la densité théorique du matériau massif (d_t).

Ainsi, la densité relative est donnée par :

$$D = \frac{d_r}{d_t} \quad (\text{II.1})$$

Pour la densité, elle est donnée par le rapport entre la masse volumique du matériau considéré et celle d'un liquide de référence, généralement l'eau. Le tableau suivant donne les densités de quelques métaux :

Tab. II.1. Densité de quelques métaux (www.astrosurf.com).

Matériaux	Densité
Aluminium	2,70
Acier	7,80
Antimoine	6,70
Tungstène	19,30
Nickel	8,00
Plomb	11,30
Or	19,32

II.3. DISTRUBITION RADIALE CUMULEE

Une augmentation continue de la coordination (nombre de contacts) peut être modélisée en supposant une structure de particule aléatoire (EAD) avec une distribution continue des distances centre à centre. Pour savoir si une sphère particulière de l'empilement est susceptible de former un nouveau contact à un certain stade de densification dépend de la répartition des particules dans son voisinage immédiat. La disposition des voisins proches d'une sphère de référence représentative peut être caractérisée par la distribution des entraxes ('fonction de densité radiale', RDF), ou plus commodément dans le contexte actuel - par son intégrale, la fonction de distribution radiale cumulée, $G(r)$. $G(r)$ indique le nombre de centres de particules dans une sphère fictive de rayon r autour de la sphère de référence. Scott et Mason cités par E. Arzt (Arzt, 1982) ont publié des fonctions radiales de la densité d'un empilement aléatoire dense. Leurs résultats montrent que $G(r)$ peut être approximé par :

$$\begin{cases} G(r) = 0 & \text{si } r < 2R \\ G(r) = Z_0 + C \left(\frac{r}{2R} - 1 \right) & \text{si } r \geq 2R \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

où Z_0 ($Z_0=7,3$) est le nombre de coordination initial et C ($C=15.5$) la pente de la fonction $G(r)$.

Cette approximation néglige une légère courbure de $G(r)$ dans l'intervalle $2R < r < 2,1R$, qui doit avoir peu d'importance, car la valeur extrapolée linéaire ($Z=7,3$) coïncide avec le nombre de coordination moyen d'une poudre sphérique tamisée. En outre, la densité relative d'un empilement dense aléatoire ($D_0=0,64$) correspond étroitement à la densité après empilement de la même poudre. Nous nous sentons donc justifiés de considérer l'empilement aléatoire dense avec un $G(r)$ linéarisé comme un modèle réaliste de la structure géométrique d'une poudre monodimensionnelle sphérique (Arzt, 1982).

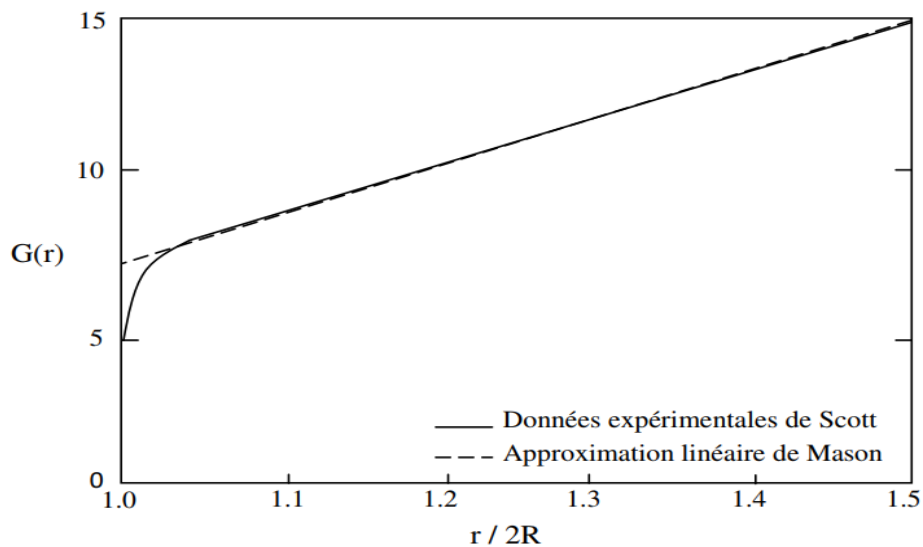


Fig. II.1. Fonction de distribution radiale cumulée d'un EAD obtenue par Mason à partir des données de Scott. *Ligne discontinue* : approximation linéaire utilisée dans les calculs (Arzt, 1982).

II.4. DENSIFICATION DES EAD

Pendant la densification, chaque particule change de forme en formant des zones de contact avec ses voisines jusqu'à ce que, à pleine densité, l'empilement des particules sphériques soit converti en un ensemble de polyèdres irréguliers remplissant l'espace. Si la densification est homogène, ces polyèdres auront une forme identique à celle du polyèdre de Voronoï de l'empilement d'origine (Fig. II.2). La densification peut être visualisée comme le retrait de ces polyèdres; la déformation des particules peut être considérée comme imposée par les parois des cellules rétrécissantes.

A tout moment, le nombre de coordination est égal au nombre de faces de Voronoï en contact avec la surface des particules. La surface de contact moyenne peut être calculée à partir de l'aplatissement de la particule de référence (Arzt, 1982).

On simule alors la densification de l'EAD par un rétrécissement des cellules de Voronoï associées à la configuration initiale des particules de la poudre. Cette hypothèse simplifie substantiellement les analyses puisque le processus intégral de densification peut être analysé à partir des calculs réalisés en utilisant une cellule unitaire simple. La taille de la cellule moyenne est déterminée au préalable par la fonction de répartition radiale d'un empilement aléatoire dense de sphères. L'avantage de cette approche réside dans la possibilité d'expliquer quantitativement la formation continue de nouveaux voisins (augmentation de la coordination des particules) (Redouani, 2013).

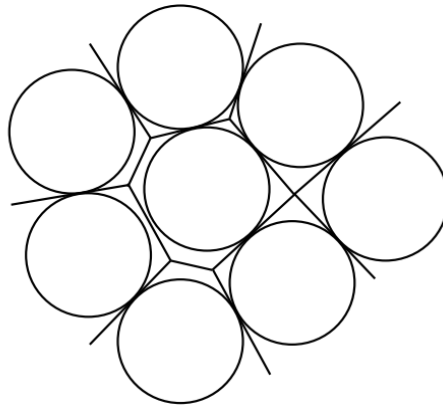


Fig. II.2. Schéma bidimensionnel de la cellule de Voronoï (Redouani , 2013).

La densification des EAD implique un accroissement des rayons des sphères, donc un volume de la matière apparaît en dehors des cellules de Voronoï (Fig. II.3 et Fig. II.4).

Le volume total de la sphère coupé par les faces de Voronoï «volume en excès» peut être déterminé par intégration sur des contacts initiaux et nouvellement formés en utilisant l'équation suivante (Redouani, 2013 ; Artz, 1982) :

$$V_{\text{ex}} = \frac{\pi}{12} (R' - R)^2 \left[4Z_0(2R' + R) + \frac{C}{R} (R' - R)(3R' + R) \right] \quad (\text{II.3})$$

où R' est le nouveau rayon après densification (accroissement).

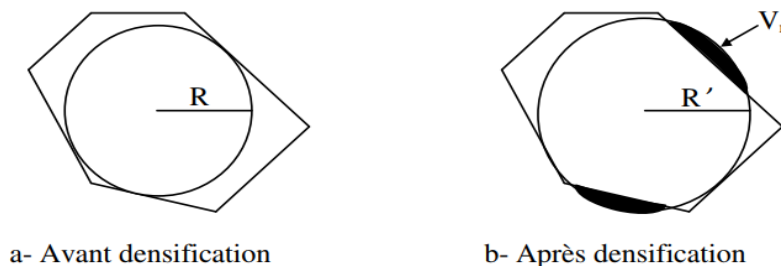


Fig. II.3. Formation du volume en excès (V_{ex}) à partir de la cellule de Voronoï où R' est le nouveau rayon des particules (Artz, 1982).

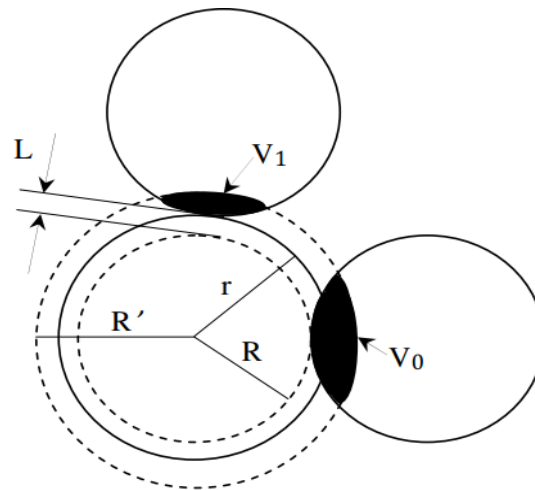


Fig. II.4. Représentation à deux dimensions des volumes de matière en excès. Les volumes V_0 et V_1 correspondent respectivement aux contacts initiaux et aux nouveaux contacts (Redouani, 2013).

II.5. STADES DE DENSIFICATION

Il existe trois stades de densification. Ils décrivent le comportement du matériau pendant la mise en forme.

Stade 0: le comportement élastique domine au sein du milieu au travers du phénomène de réarrangement granulaire. Un tel comportement est activé par exemple pendant les phases de remplissage d'une matrice et de transfert de la poudre dans la matrice, au tout premier stade de la compression, ou encore lors d'une phase de densification par vibration prenant effet juste après un remplissage.

- **Stade 1:** Le comportement plastique apparaît. A ce stade, la plastification se limite uniquement au niveau des zones de contacts préalablement établies, les surfaces de contact impliquées restant très petites comparativement aux surfaces totales des grains. Ce comportement peut être activé lors de la phase de remplissage au cours de laquelle les grains s'entrechoquent. Dans le contexte général de la compression à froid, ce phénomène est systématiquement observé en début de compression marquant ainsi la fin du stade 0.
- **Stade 2:** le comportement plastique associé à de grandes déformations prédomine à l'échelle du bloc granulaire. A ce stade, le milieu granulaire peut être considéré davantage comme un milieu continu plutôt qu'un milieu discret. Il est ainsi possible d'utiliser par exemple le terme de massif poreux à faible cohésion mécanique. Les grandes amplitudes de déformations des particules entraînent la diminution progressive du volume total des porosités. La frontière entre le domaine discret et le

domaine continu est quasi-inexistante. Ce stade 2 qui reste encore mal appréhendé par les modélisations et plus particulièrement les lois de contact (Jerier, 2009).

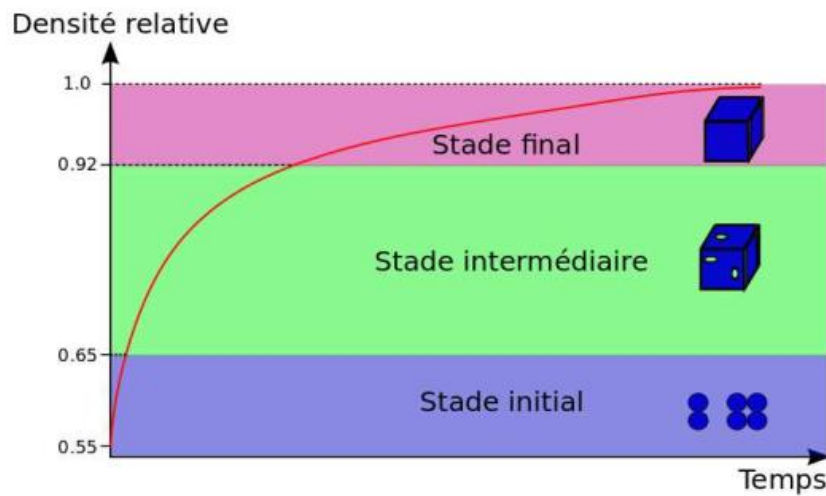


Fig. II.5. Évolution de la densité relative au cours du frittage (Tossoukpe, 2013).

Il faut cependant noter que le stade 0 est observé avant l'atteinte de la configuration d'un EAD. C'est-à-dire que les mécanismes de glissement et de réarrangement des particules ne sont plus mis en œuvre une fois les agrégats de poudres sont considérés comme des EAD.

II.6. PARAMETRES DES EAD

II.6.1. Nombre de coordination

La coordinence (ou coordinance) d'un atome est le nombre d'atomes voisins les plus proches dans les trois directions de l'espace. Elle s'appelle aussi le nombre de coordination ou l'indice de coordination.

Il est défini aussi comme étant une moyenne du nombre de contacts sur les sphères appartenant à un milieu granulaire. Il est un paramètre incontournable dans les empilements de sphères qui spécifie l'arrangement des particules dans un assemblage désordonné. Sa connaissance aide à la compréhension de nombreuses caractéristiques physiques de l'empilement telles que la consolidation, la conductivité électrique ou thermique, la résistance en traction, etc.

Il joue aussi un rôle déterminant dans l'analyse du frottement inter-granulaire, de la déformation élastique et la répartition des forces de contact (Voivret et al., 2009).

Pour un empilement ordonné, le nombre de coordination est le même pour toutes les sphères et il prend une valeur spécifique qui dépend du type d'arrangement :

- 6 contacts par sphères pour un empilement cubique ;
- 8 contacts par sphères pour un empilement rhombique ;
- 12 contacts par sphères pour un empilement rhombohédrique.

Dans les empilements ordonnés, normalement le nombre de coordination (Z) varie de 4 à 12, tandis que pour ceux qui sont désordonnés le nombre de coordination varie de 2 à 9 uniquement.

Le nombre de coordination pour chaque sphère dans un empilement est calculé en cherchant les différents contacts entre les sphères, soit :

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{sphères}}} N_c(i)}{N_{\text{sphères}}} \quad (\text{II.4})$$

où $N_{\text{sphères}}$ est le nombre total de sphères et $N_c(i)$ le nombre de contact pour la sphère i (Jerier, 2009).

J. L. Chermant (Chermant et al., 1986) a donné une relation qui permet de lier le nombre de coordination N_c des particules au nombre de contacts n_c par unité de volume et au nombre de particules n_v par unité de volume par la relation :

$$N_c = 2n_c/n_v \quad (\text{II.5})$$

Dans cette formule, le facteur 2 est imposé par le fait que chaque contact est partagé par deux particules et intervient donc deux fois dans le décompte de N_c .

Ce paramètre augmente avec la densification. Les modèles pour le nombre de coordination par rapport à la densité du compacte diffèrent de manière significative. Certains traitements de consolidation de la poudre ignorent les changements du nombre de coordination lors de la densification, d'autres supposent de manière inappropriée un conditionnement ordonné et d'autres appliquent des interpolations linéaires de la densité aléatoire à la densité maximale. La coordination minimale, évidente lorsque les forces gravitationnelles sont relativement faibles, comme avec les poudres de taille nanométrique, est d'environ 3 contacts par particule. Les particules plus grosses soumises à des forces gravitationnelles relativement fortes se tassent de manière aléatoire à environ 6 à 7 contacts à des densités fractionnaires proches de 0,58 à 0,64. Les structures terminales de densité totale convergent vers les grains avec presque 14 voisins en contact. Le lien entre le nombre de coordination et la densité est essentiel pour les traitements mathématiques du frittage, de la consolidation sous pression et du compactage.

En outre, des propriétés telles que la résistance au compactage ou la conductivité électrique dépendent du nombre de coordination. Les données recueillies sur un large éventail d'expériences conduisent à une relation généralisée entre le nombre de coordination et le carré de la densité de solides fractionnaire, fournissant une relation simple mais précise pour l'intégration dans les calculs de consolidation de la poudre (German, 1996).

Pour évaluer le nombre de coordination au cours de la densification, E. Arzt (Arzt, 1982) propose la relation suivante :

$$\begin{cases} Z = Z_0 + 9,5(D - D_0) & \text{pour } D_0 \leq D \leq 0,85 \\ Z = Z_0 + 2 + 9,5(D - D_0) + 881(D - D_0)^3 & \text{pour } 0,85 < D \leq 1 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Ensuite, Helle (Helle et al., 1985) a adopté une expression moins complexe afin de simplifier les calculs des contributions des mécanismes de densification par compression isostatique à chaud. Il a proposé l'équation suivante :

$$Z = 12D \quad (\text{II.7})$$

Cela suppose évidemment que le nombre de coordination ne peut dépasser 12 à la densification complète.

Une approximation plus réaliste est proposée par Redouani (Redouani et Boudrahem, 2012). En effet, au premier stade de densification, quand D est compris entre 0,64 et 0,92, il considère que la l'approximation de Helle est raisonnable. Cependant, au cours de l'ultime étape de densification ($D > 0,92$) où les pores sont fermés, l'évolution de Z n'est plus possible et est égale à 12.

II.6.2. Surface de contact

Hertz a été le premier à trouver la relation entre l'évolution de la surface de contact (a) entre deux sphères en fonction de l'interpénétration (h), soit :

$$A_c = a^2/h \quad (\text{II.8})$$

La densification d'un empilement aléatoire dense provoque un élargissement des aires des contacts entre les particules. La surface moyenne de contact a est évaluée par l'expression suivante :

$$a = \frac{1}{Z} (Z_0 a_0 + A_1) \quad (\text{II.9})$$

où $Z_0 a_0$ représente la surface totale des contacts initiaux et A_1 celle des nouveaux contacts.

En utilisant la cellule de Voronoï et la distribution radiale cumulée, Arzt (Arzt, 1982) a développé une approche permettant d'évaluer la surface de contact entre particules. Il a trouvé l'expression suivante :

$$a = \frac{\pi \left[3Z_0(R''^2 - R^2) + \frac{C}{R} (2R''^3 - 3R''^2R + R^3) \right]}{Z_0 + C \left(\frac{R''}{R} - 1 \right)} \quad (\text{II.10})$$

avec R'' le rayon corrigé des particules après densification.

Dans le cas particulier du frittage sous pression, cette expression a été simplifiée par E. Arzt qui évalue a par :

$$a = 3(D - D_0)R \quad (\text{II.11})$$

Notons que dans l'approche d'Arzt, la surface de contact évolue en continue tout au long de la densification, c'est-à-dire sans prise en compte des stades de densification.

En 1983, Arzt et ses collaborateurs ont proposé une nouvelle expression qui permet d'évaluer la surface totale de contact au premier stade de densification ($0,64 < D \leq 0,92$), soit :

$$aZ = \frac{(D - D_0)}{D} [160(D - D_0) + 16]R^2 \quad (\text{II.12})$$

Au stade II ($0,92 < D \leq 1$), le comprimé est assimilé à un solide homogène avec des particules de forme tétraédrique dont les 24 sommets sont occupés par des petits pores sphériques. Ainsi, la formule proposée est :

$$a = \frac{\pi (D - D_0)}{3 (1 - D_0)} R^2 \quad (\text{II.13})$$

Le modèle établi sur la base de ses équations a conduit à des prévisions théoriques qui n'étaient pas en bon accord avec les données expérimentales. Redouani (Redouani et Boudrahem, 2012) a tenté de remédier aux insuffisances des prévisions du modèle en réévaluant la surface moyenne de contact.

Au premier stade, l'expression établie est :

$$a = \frac{2\pi}{3} \left(\frac{D - D_0}{D_0} \right) R^2 \quad (\text{II.14})$$

Au stade final, une nouvelle forme géométrique est proposée pour la représentation des particules déformées, soit un dodécaèdre avec douze facettes (Fig. II.6). Ainsi, l'expression de la surface moyenne de contact correspondant à une facette est évaluée par :

$$a = \frac{\pi R^2}{3} \left[1 - 5 \left(\frac{1 - D}{5D} \right)^{2/3} \right] \quad (\text{II.15})$$

Le rayon des petits pores (r_p) occupant les sommets du dodécaèdre est évalué par :

$$r_p = R \left(\frac{1-D}{5D} \right)^{1/3} \quad (\text{II.16})$$

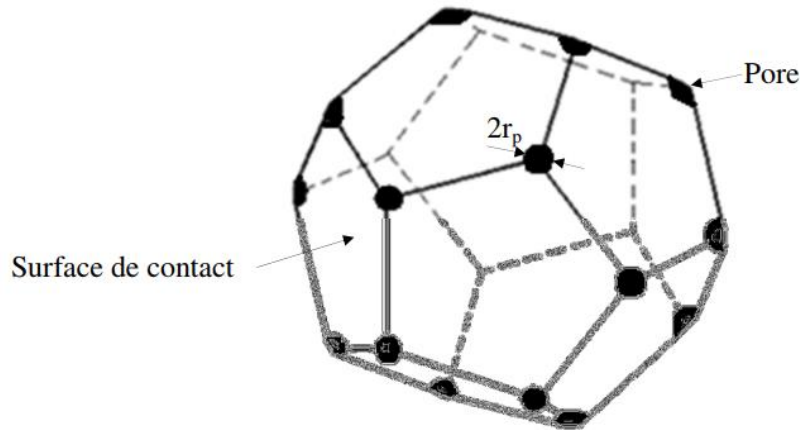


Fig. II.6. Modèle géométrique utilisé pour décrire les particules des agrégats de poudres durant le stade final de densification (Redouani et Boudrahem, 2012).

II.6.3. Pression efficace

Dans le cas du frittage contraint, notamment en compression isostatique à chaud, un autre paramètre des EAD, très important dans la modélisation des mécanismes de densification, rentre en jeu. Il s'agit de la pression efficace ou effective P_{eff} qui est la pression qui s'exerce au niveau des contacts entre particules. Celle-ci dépend de la surface de contact totale à la surface d'une particule.

En étudiant l'état de transmission des contraintes dans un EAD, on peut évaluer la pression efficace par l'expression suivante (Redouani et Boudrahem, 2012) :

$$P_{\text{eff}} = \frac{4\pi R^2}{Za} P \quad (\text{II.17})$$

avec P la pression appliquée.

Les expressions de la pression efficace en fonction de la densité relative, au stade initial et au stade final de la densification, sont obtenues en remplaçant le nombre de coordination et la surface moyenne de contact entre particules par leurs relations respectives.

II.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différents travaux réalisés sur la modélisation de la densification des agrégats de poudres en étudiant les empilements aléatoires denses. Nous nous sommes cependant limités à l'évaluation des paramètres des EAD, soient le nombre de coordination, la surface moyenne de contact et la pression efficace.

Dans ces travaux, les particules de poudres sont considérées sphériques et monodimensionnelles. Ainsi, et en utilisant la distribution radiale cumulée et la cellule de Voronoï, des relations plus au moins simples des différents paramètres en fonction de la densité relative ont pu être développées.

CHAPITRE III :

**EMPILEMENT ALEATOIRE DENSE DE
PARTICULES BIDIMENSIONNELLES**

III.1. INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre précédant, que pour certaines techniques de la MDP, notamment le frittage sous charge tel que la CIC, on étudie la densification des poudres en assimilant les agrégats de poudres à des empilements aléatoires denses (EAD) de particules sphériques monodimensionnelles. D'autre part, tel qu'il est souligné dans le chapitre I, la distribution de la taille des particules joue un rôle très important dans l'évolution de la densification.

Dans ce chapitre, nous allons donc proposer une nouvelle approche pour l'étude de la densification des EAD de particules sphériques bidimensionnelles de rayons R_1 et R_2 . Ainsi, les mêmes procédures de calculs pour des sphères identiques seront suivies pour évaluer les paramètres intervenant pendant la densification telle que le nombre de coordination (Z), la surface de contact (a) et la pression efficace (P_{eff}) en fonction de la densité relative (D).

On considère que la densification se fait en deux étapes, la première correspond au Stade I, où la densité relative est comprise entre 0,64 et 0,92 avec une porosité ouverte et interconnectée, et la deuxième étape (stade II), où la densité est supérieure à 0,92 et la porosité est fermée et de forme sphérique.

III.2. DENSIFICATION DES EMPILEMENTS ALEATOIRES DENSES

III.2.1. Nombre de coordination

Dans les modèles d'Arzt et Helle (Arzt, 1982 ; Helle et al., 1985), il est supposé que le nombre de coordination (Z) augmente, au cours de la densification d'un EAD de particules sphériques de même dimension, jusqu'à atteindre une valeur de 14 en fin de densification. Cependant, en se basant sur plusieurs études, Redouani (Redouani et Boudrahem, 2012) a montré que Z ne pourra en aucun cas dépasser 12 et, en plus, il est constant au stade II vu que la porosité est fermée.

Ainsi, pour des particules de rayons différents (R_1 et R_2), on estime que Z peut atteindre 14 mais à une densité relative égale à 0,92. En suite, il reste constant jusqu'à la densification complète.

D'après l'approche de Redouani (Redouani, 2013), Z évolue en deux étapes au premier stade de densification. Quand D est proche de sa valeur initiale ($0,64 \leq D_0 \leq 0,75$), il admet que l'expression du nombre de coordination peut être obtenue à partir du développement limité à

l'ordre un de l'expression donnant le rayon des particules en fonction de la densité relative D (Eq. III.1) établie par E. Arzt (Arzt et al., 1983) combinée à la distribution radiale cumulée (Eq. II.2).

$$R' = R \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/3} \quad (\text{III.1})$$

L'expression obtenue est la suivante :

$$Z = Z_0 + \frac{1}{3}C \left(\frac{D - D_0}{D_0} \right) \quad (\text{III.2})$$

Après remplacement de C et D_0 par leurs valeurs, on obtient :

$$Z = Z_0 + 8,07(D - 0,75) \quad (\text{III.3})$$

La deuxième étape du stade I correspond à une densité relative comprise entre 0,75 et 0,92 où Z évolue rapidement jusqu'à atteindre la valeur maximale de 14. L'expression de Z est obtenue avec un développement limité de troisième ordre et en prenant compte des conditions aux limites, soit :

$$Z = Z_0 + c_1 + 8,07(D - 0,75) + c_2(D - 0,75)^3 \quad (\text{III.4})$$

où c_1 et c_2 sont des constantes qui assurent la continuité de la fonction $Z(D)$ dans les deux étapes. Elles sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} Z(0,75) = 8,18 \\ Z(0,92) = 14 \end{cases} \quad \text{En utilisant l'équation (III.3)} \quad (\text{III.5})$$

Ainsi, $c_1=0,89$.

Donc pour $Z(0,92) = 14$, on cherche la valeur de c_2 , soit :

$$Z = Z_0 + 0,89 + 8,07(D - 0,75) + c_2 (D - 0,75)^3 \quad (\text{III.6})$$

Ainsi :

$$c_2 = \frac{Z - [Z_0 + 0,89 + 8,07(D - 0,75)]}{(D - 0,75)^3} \quad (\text{III.7})$$

Après calcul, on trouve que $c_2= 903$.

Le nombre de coordination s'exprime alors par :

$$Z = Z_0 + 0,89 + 8,07(D - 0,75) + 903(D - 0,75)^3 \quad (\text{III.8})$$

Enfin, l'expression permettant d'évaluer Z au cours des deux stades de densification pour des EAD de particules sphériques bidimensionnelles est donnée par :

$$\begin{cases} Z = Z_0 + 8,07(D - 0,75) & \text{pour } 0,64 \leq D_0 \leq 0,75 \\ Z = Z_0 + 0,89 + 8,07(D - 0,75) + 903(D - 0,75)^3 & \text{pour } 0,75 < D_0 \leq 0,92 \\ Z = 14 & \text{pour } 0,92 < D_0 \leq 1 \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

III.2.2. Surface de contact

La densification d'un EAD est accompagnée d'un élargissement de l'aire des contacts entre les particules. Plusieurs investigations ont été menées auparavant pour établir des équations permettant d'évaluer la surface moyenne de contact a en fonction de la densité relative D (Redouani, 2013). Toutes ces équations sont établies pour un EAD de particules sphériques de même taille.

Pour notre part, nous avons cherché à développer de nouvelles pour évaluer a en considérant que les EAD sont constitués de particules bidimensionnelles (de deux tailles différentes).

Nous avons vu précédemment (chapitre II) qu'au stade I le processus de densification est modélisé par le grossissement des particules, c'est-à-dire que chaque particule sphérique augmente son rayon autour de son centre considéré fixe (Fig. III.1). Ainsi, les rayons initiaux des deux particules sont R_1 et R_2 , leurs nouveaux rayons sont respectivement R'_1 et R'_2 .

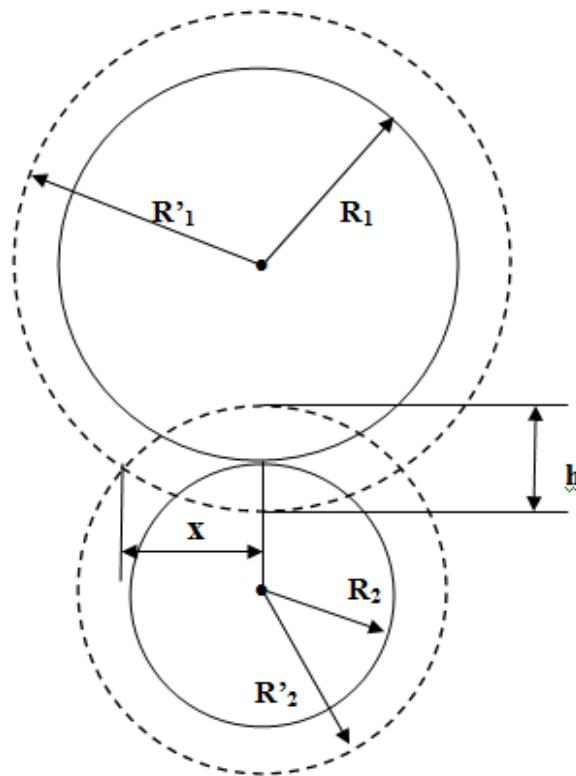


Fig. III.1. Grossissement et imbrication de deux particules sphériques de rayons différents.

En reprenant l'équation III.1 et en utilisant les rayons des deux sphères, on aboutit à l'expression suivante donnant les nouveaux rayons des particules en fonction des rayons initiaux et de la densité relative, soit :

$$\begin{cases} R'_1 = R_1 \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1/3} \\ R'_2 = R_2 \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1/3} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

La surface de contact initial est donnée par :

$$a = \pi x^2 \quad (\text{III.11})$$

avec x le rayon du contact circulaire.

Des considérations géométriques permettent d'approcher la distance d'imbrication h par :

$$h = (R'_1 - R_1) + (R'_2 - R_2) \quad (\text{III.12})$$

A partir des travaux d'Hertz (Landau, 1967) sur les contacts élastiques entre particules sphériques, on estime que la distance d'imbrication entre deux particules sphériques monodimensionnelles peut s'exprimer comme suit :

$$h = 2 \frac{x^2}{R} \quad (\text{III.13})$$

donc :

$$x^2 = \frac{h R}{2} \quad (\text{III.14})$$

En remplaçant x^2 par cette dernière expression, l'équation (III.11) devient :

$$a = \pi \frac{h R}{2} \quad (\text{III.15})$$

Olmos (Olmos Navarrete, 2009) a défini un rayon équivalent (R) pour chaque paire de particules en contact, soit :

$$R = 2 \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (\text{III.16})$$

En remplaçant R dans l'équation (III.15), on trouve :

$$a = \pi h \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (\text{III.17})$$

On combine l'équation (III.17) et l'équation (III.12), a devient :

$$a = \pi [(R'_1 - R_1) + (R'_2 - R_2)] \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{III.18})$$

On remplace maintenant R'_1 et R'_2 par leurs expressions (Eq. III.12), on obtient :

$$a = \pi \left[R_1 \left\{ \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/3} - 1 \right\} + R_2 \left\{ \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/3} - 1 \right\} \right] \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{III.19})$$

Après calcul et simplification, on obtient l'équation finale de la surface moyenne de contact au premier stade de densification, soit :

$$a = \pi R_1 R_2 \left[\left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (\text{III.20})$$

Dans l'ultime stade de densification, les pores sont isolés et de forme sphérique. Comme le nombre de contact dans ce stade est égal à 14, on adopte le modèle d'Ashby pour décrire la forme des particules dans ce stade. En effet, Ashby et ses collaborateurs assimilent les particules de poudre à des tétradécaèdres (polyèdre de Kelvin) dont les sommets sont occupés par les pores résiduels et ses 14 facettes correspondent aux surfaces de contacts (Fig. III.2).

Il faut cependant signaler qu'Ashby a utilisé ce modèle pour des particules de même dimension. Alors que pour notre part, c'est pour des particules de deux tailles différentes. Effectivement, on observe dans la figure III.2 que le polyèdre comporte deux types de facettes. Le premier correspond à des hexagones réguliers, qu'on peut adopter pour les facettes des particules de grand rayon (R_1), et le deuxième, qu'on adopte pour les facettes des particules de petit rayon (R_2), correspond à des carrés.

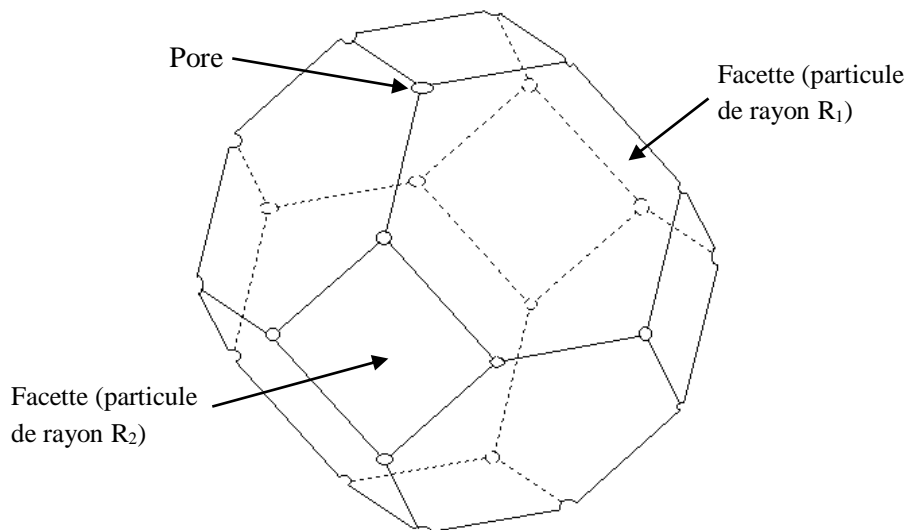


Fig. III.2. Modèle géométrique pour décrire la forme des particules bidimensionnelles au dernier stade de densification des EAD.

Dans ce cas et à ce stade, on va établir de nouvelles expressions pour évaluer la surface moyenne de contact entre particules et le rayon des pores au stade final de densification.

Sachant qu'un pore est partagé entre quatre particules voisines, la surface totale des contacts est ainsi donnée par :

$$aZ = 4\pi R^2 - \frac{24}{4}(4\pi r_p^2) \quad (\text{III.21})$$

où r_p est le rayon des pores sphériques.

La densité d de l'empilement de N tétradécaèdres est définie alors par :

$$d = \frac{m}{V_T} = \frac{m}{N \frac{4}{3}\pi (R^3 + 6r_p^3)} \quad (\text{III.22})$$

où m et V_T représentent respectivement la masse et le volume de l'empilement considéré.

La densité relative est le rapport de la densité instantanée sur la densité de l'empilement totalement densifié (sans porosité), soit :

$$D = \frac{N \left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)}{N \frac{4}{3}\pi (R^3 + 6r_p^3)} \quad (\text{III.23})$$

Après simplification, on trouve que :

$$D = \frac{R^3}{R^3 + 6r_p^3} \quad (\text{III.24})$$

Ainsi, les calculs donnent la formule permettant d'évaluer le rayon moyen des pores sphériques en fonction de la densité relative. Elle s'écrit :

$$r_p = R \left(\frac{1-D}{6D}\right)^{1/3} \quad (\text{III.25})$$

Cette expression révèle l'erreur existante dans l'expression établie par Ashby et ses collaborateurs (Arzt et al., 1983). En effet, l'expression proposée par ses derniers est la suivante :

$$r_p = R \left(\frac{1-D}{D}\right)^{1/3} \quad (\text{III.26})$$

En remplaçant r_p par son expression (Eq. III.25) dans l'équation III.21, on obtient :

$$aZ = 4\pi R^2 \left[1 - 6 \left(\frac{1-D}{6D}\right)^{2/3} \right] \quad (\text{III.27})$$

Comme dans le stade final $Z=14$, et après remplacement de R par son expression en fonction de R_1 et R_2 (Eq. III.16), on évalue la surface moyenne de contact au deuxième stade de densification par :

$$a = \frac{8}{7} \pi \frac{(R_1 R_2)^2}{(R_1 + R_2)^2} \left[1 - 6 \left(\frac{1-D}{6D} \right)^{2/3} \right] \quad (\text{III.30})$$

III.2.3. Pression efficace

Nous avons vu dans le second chapitre que la pression efficace peut s'exprimer en fonction du nombre de coordination et la surface moyenne de contact par :

$$P_{\text{eff}} = \frac{4\pi R^2}{aZ} P \quad (\text{III.31})$$

En utilisant cette expression, établit pour étudier la transmission des contraintes à travers un EAD de particules sphériques, on va recalculer la pression efficace dans les deux stades de densification pour des EAD de particules sphériques bidimensionnelles, en remplaçant Z , a et R par leurs expressions. On trouve alors que :

- Dans le stade I, l'expression de P_{eff} est divisée en deux parties selon les valeurs de Z :

$$\begin{cases} Z = Z_0 + 8,07(D - D_0) & \text{pour } 0,64 \leq D < 0,75 \\ Z = Z_0 + 0,89 + 8,07(D - 0,75) + 903(D - 0,75)^3 & \text{pour } 0,75 \leq D < 0,92 \\ a = \pi R_1 R_2 \left[\left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/3} - 1 \right] & \text{pour } 0,64 \leq D < 0,92 \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

et en remplaçant R par son expression (Eq. III.16) dans l'équation III.31, on obtient :

$$P_{\text{eff}} = \frac{16}{Z \left[\left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/3} - 1 \right]} \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} P \quad (\text{III.33})$$

- Dans le deuxième stade ($0,92 \leq D < 1$), où :

$$\begin{cases} Z = 14 \\ a = \frac{8}{7} \pi \frac{(R_1 R_2)^2}{(R_1 + R_2)^2} \left[1 - 6 \left(\frac{1-D}{6D} \right)^{2/3} \right] \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

la pression efficace est évaluée par :

$$P_{\text{eff}} = \frac{1}{\left[1 - 6 \left(\frac{1-D}{6D} \right)^{2/3} \right]} P \quad (\text{III.35})$$

III.3. RESULTATS ET DISCUSSION

III.3.1. Nombre de coordination

L'évolution du nombre de contacts par particule en fonction de la densité relative instantanée est représentée par la courbe en trait continu de la figure III.3 en utilisant l'équation III.9. Pour mettre en évidence la différence, nous avons également représenté dans cette figure l'approche de Redouani (Redouani, 2013) en trait discontinu.

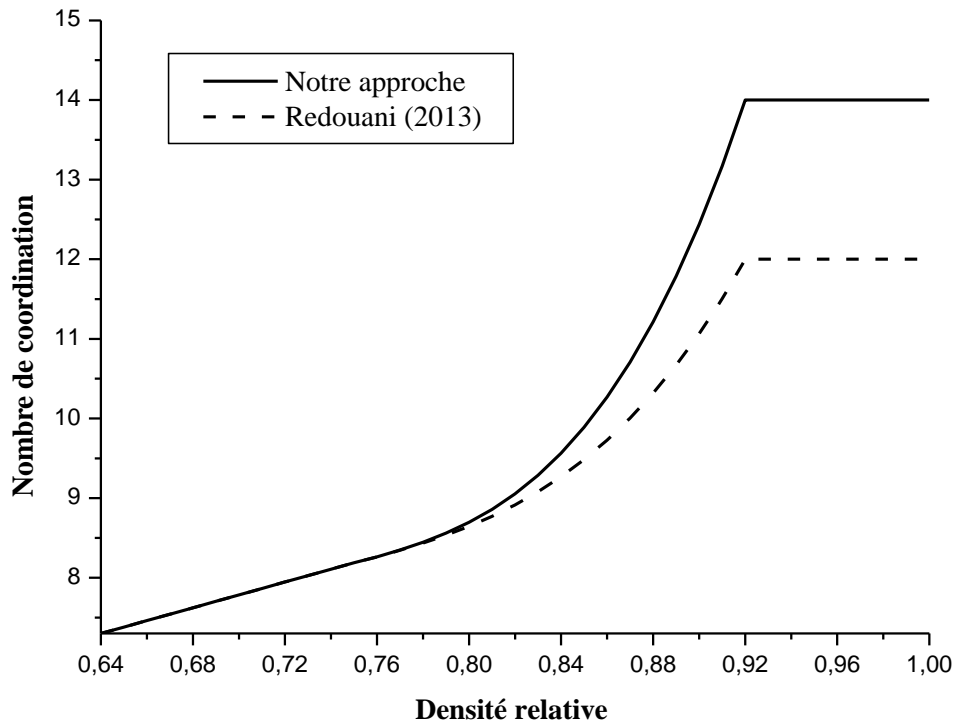


Fig. III.3. Evolution du nombre de coordination en fonction de la densité relative.

Les résultats obtenus montrent que le nombre de coordination augmente lentement au début de la densification. Quand D dépasse 0,75, le nombre de contacts par particule augmente rapidement. On peut expliquer cette évolution rapide par la transformation morphologique engendrée au niveau de la phase poreuse, elle passe progressivement d'une forme interconnectée à une fine dispersion de pores sphériques. A cause de cette évolution morphologique, le nombre de coordination atteint sa valeur maximale ($Z=14$) quand la densité relative atteint 92% et reste constant tout au long de l'intervalle $[0,92 - 1]$.

L'allure de la courbe que nous avons obtenue est semblable à celle obtenue par l'approche de L. Redouani mais avec des valeurs plus élevées. Cela semble logique car, dans notre cas, nous

avons considéré des particules de tailles différentes ce qui augmente relativement le nombre de coordination.

III.3.2. Surface de contact

L'évolution de la surface de contact en fonction de la densité relative est évaluée en deux étapes, la première au stade I où D compris entre 0,62 et 0,92 et l'autre dans le second stade où $0,92 \leq D \leq 1$. En utilisant les équations III.20 et III.30, on prend comme valeurs des deux rayons R_1 et R_2 respectivement $10\mu\text{m}$ et $5\mu\text{m}$. Cette évolution est représentée par la courbe en trait continu dans la figure III.4. Les deux autres courbes (en traits discontinus) représentent l'évolution de a en utilisant l'approche de Redouani (Redouani, 2013) pour des particules de même rayon en prenant les valeurs $10\mu\text{m}$ et $5\mu\text{m}$ séparément.

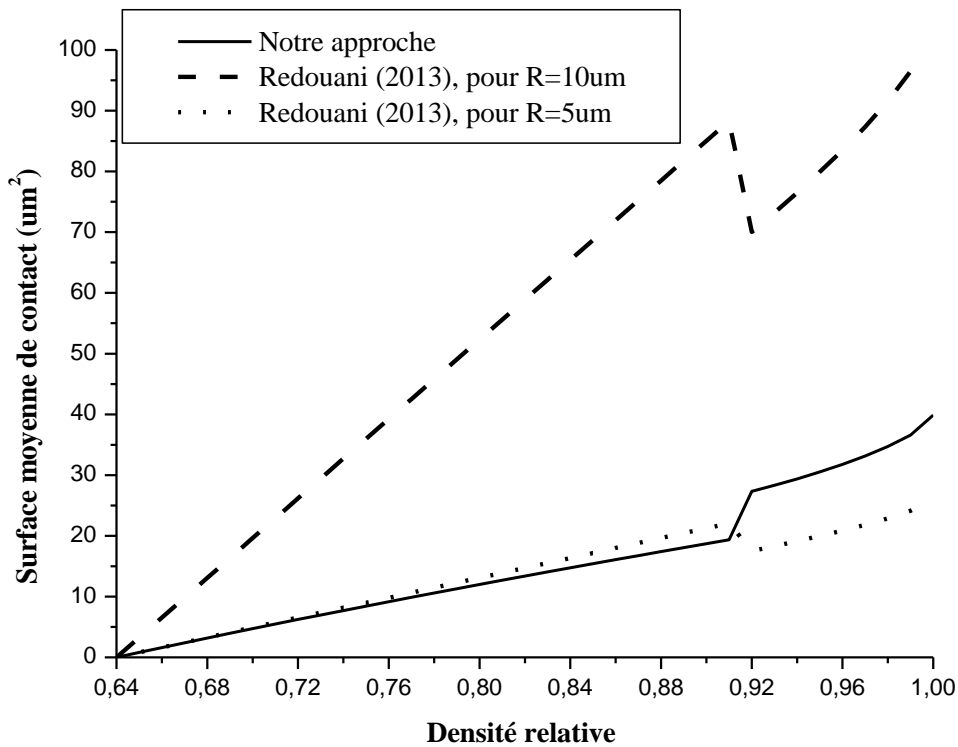


Fig. III.4. Evolution de la surface de contact en fonction de la densité relative.

Les courbes représentées dans la figure III.4 donnent une idée sur l'évolution de la surface de contact en fonction de la densité relative. On peut observer une discontinuité au niveau du passage du stade I au stade II. Pour notre approche, on remarque que dans l'intervalle $[0,64 - 0,92]$, la surface de contact augmente linéairement et lentement. Ensuite, quand $D \geq 0,92$, a augmente rapidement. Cela est dû à la fermeture et la dispersion des pores sphériques.

Dans les courbes correspondant à l'approche de L. Redouani, on observe une discontinuité contestable dans l'évolution de l'aire de contact. En effet, cette discontinuité représente une diminution de a au niveau de passage de stade I au stade II, ce qui ne correspond pas à la réalité.

Pour mieux appréhender les résultats de notre approche, nous avons tracé plusieurs allures pour la surface de contact moyenne pour différentes valeurs des rayons R_1 et R_2 . La figure ci-dessous (Fig. III.5) montre que quand R_1 et R_2 sont très différents ($R_1 \geq 2R_2$ approximativement par exemple $R_1 = 10\mu\text{m}$ et $R_2 = 5\mu\text{m}$), l'évolution de la surface de contact diminue au niveau du passage du stade I au stade II. Cette diminution peut s'expliquer par le fait que l'approximation choisie pour le rayon des particules (Eq. III.16) est valable quand les deux tailles des particules sont proches.

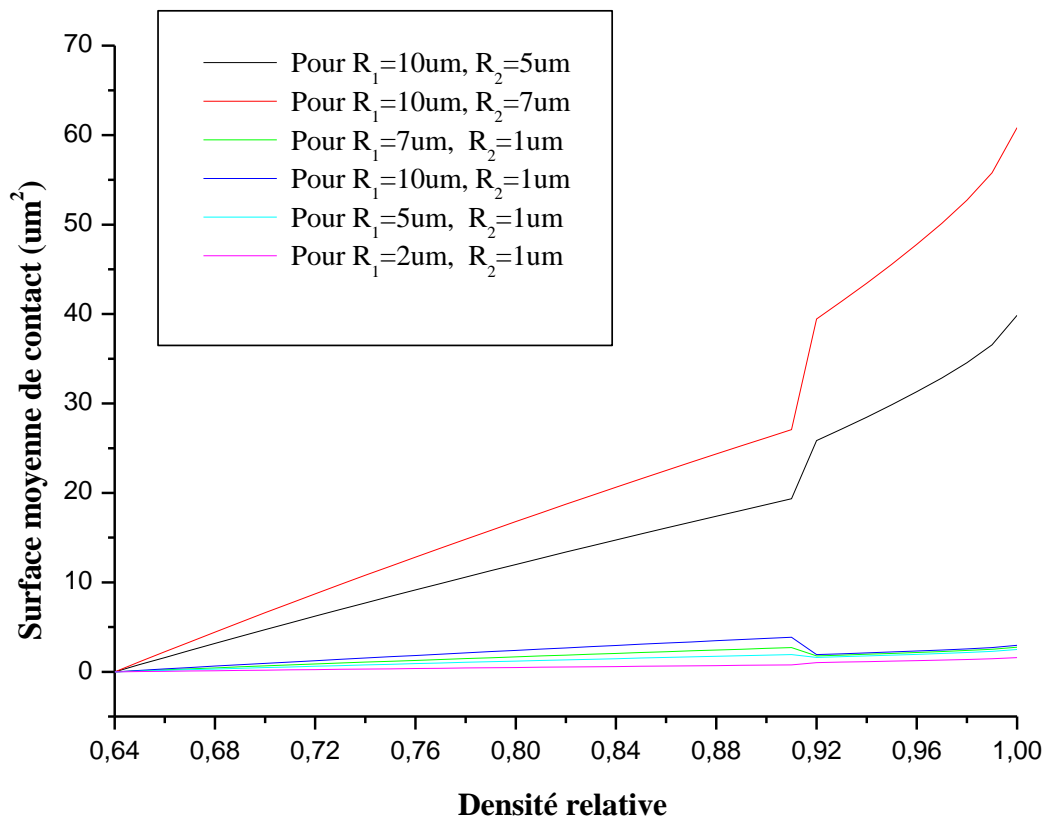


Fig. III.5. Evolution de la surface de contact moyenne pour des différentes valeurs de R .

III.3.3. Pression efficace

On trace la variation de la pression efficace en fonction de la densité relative en utilisant les équations III.33 et III.35. L'évolution de P_{eff} est représentée par la Fig. III.6. Nous avons choisi de représenter le rapport P_{eff}/P dans les figures afin d'éviter d'estimer P qui n'a aucune influence sur l'allure des courbes.

Pour la comparaison, nous avons représenté dans la même figure l'approche de Redouani (Redouani, 2013) pour les deux rayons $10\mu\text{m}$ et $5\mu\text{m}$ (séparément).

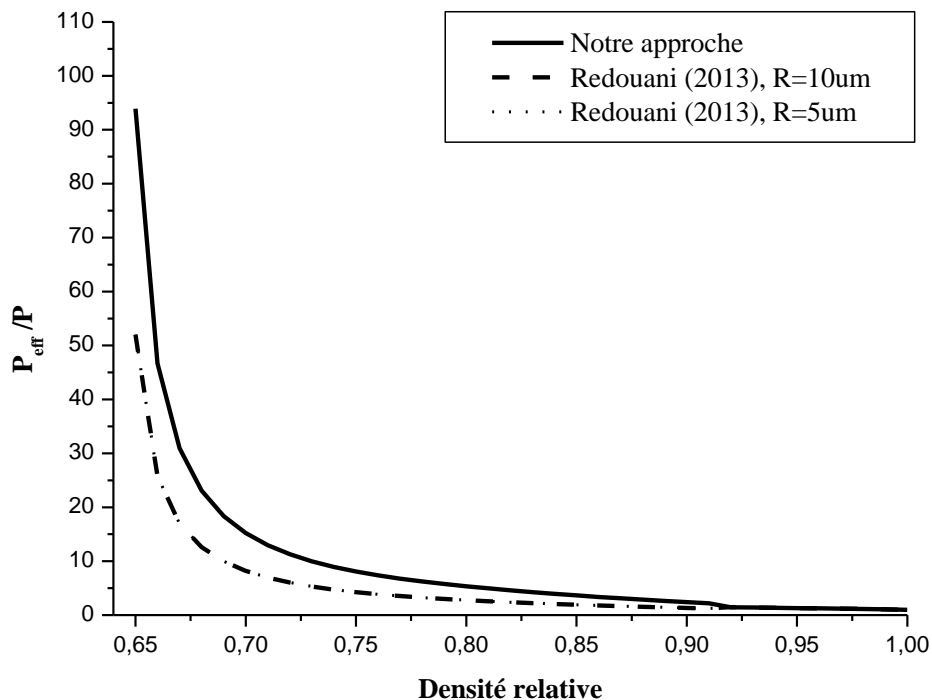


Fig. III.6. Evolution de la pression efficace en fonction de la densité relative.

La figure III.6 montre que P_{eff} diminue au cours de la densification. Au début de la densification, la pression efficace tend vers l'infini car la surface de contact est ponctuelle. Elle atteint sa valeur minimale, égale à la pression appliquée P , à la fin de la densification, c'est-à-dire quand la surface de contact est égale à la surface totale de la particule de poudre. En effet, nous avons vu que la pression efficace dépend de la surface d'une particule par rapport à la surface totale, sachant que dans notre approche nous avons considéré que, pendant la densification des EAD, les surfaces des particules s'élargissent alors que la surface totale reste fixe, donc la pression exercée au niveau des contacts entre particule va diminuer.

Par comparaison, la pression efficace calculée en utilisant l'approche de L. Redouani diminue aussi mais avec des valeurs plus petites. Nous avons trouvé que les valeurs de la P_{eff} sont les mêmes soit avec la valeur de $R=10\mu\text{m}$ ou bien de $R=5\mu\text{m}$.

La figure III.7 montre que l'allure de la pression efficace n'est pas affectée par le changement des rayons de R_1 et R_2 . Par contre, ce changement affecte les valeurs de la pression efficace, c'est-à-dire que les valeurs de P_{eff} sont quand la différence entre R_1 et R_2 est plus importante.

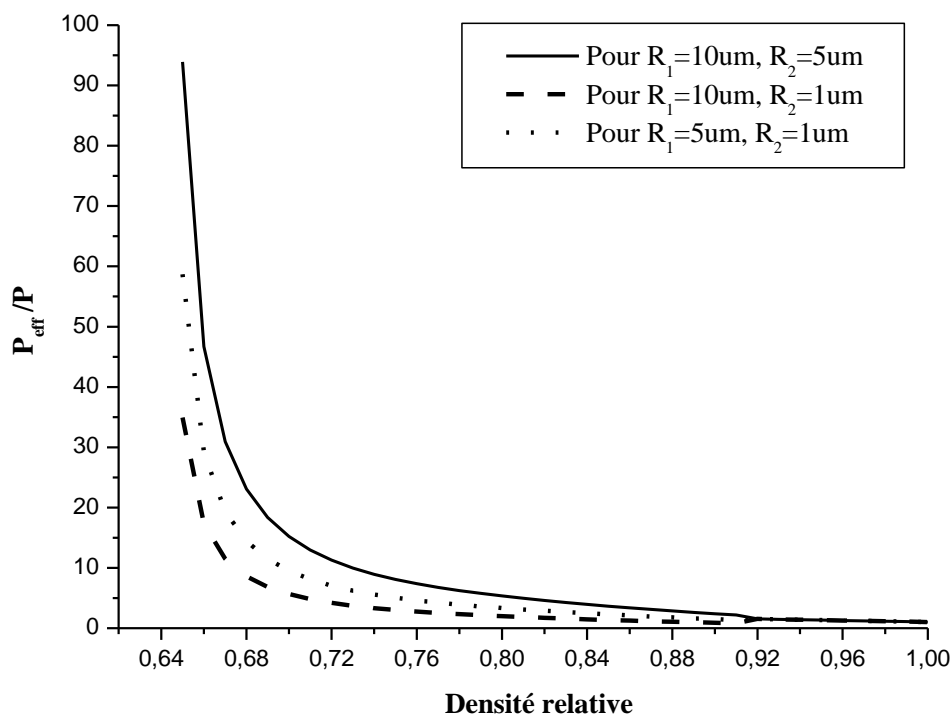


Fig. III.7. Variation de la pression efficace pour des différentes valeurs de R_1 et R_2 .

III.4. CONCLUSION

Pendant la densification, les poudres peuvent subir des modifications morphologiques. Ces modifications provoquent une augmentation du nombre de coordination ainsi qu'un élargissement des surfaces de contacts jusqu'à ce que la densité totale du système soit atteinte ($D=1$). L'étude des mécanismes de densification doit donc tenir compte de l'évolution de ces paramètres géométriques. Pour satisfaire à cette exigence, nous avons été amenés à assimiler les agrégats de poudre à des empilements aléatoires denses de particules sphériques de tailles différentes. Cette approche nous a permis d'exprimer le nombre de coordination et la surface

moyenne de contact en fonction de la densité relative atteinte dans le comprimé. La pression efficace a été ensuite évaluée en utilisant les nouvelles expressions du nombre de coordination et de la surface moyenne de contact.

Les résultats obtenus sont représentés par des figures comportant des courbes qui représentent les différents paramètres des EAD en fonction de la densité relative. Ces résultats sont également comparés à des résultats d'une approche développée par L. Redouani correspondant à des particules monodimensionnelles.

CONCLUSION GENERALE

La densification des empilements aléatoires dense (EAD) des poudres métalliques exerce des forces sur les contacts entre particules, cela provoque des modifications morphologiques au sein de ces derniers. Ces modifications influent sur les paramètres intervenants pendant la densification.

Beaucoup de travaux sont réalisés pour étudier le comportement des particules pendant la densification dans le cas où les particules ont la même taille. Les résultats de ces approches montrent toujours que les paramètres de densification tels que le nombre de coordination et la surface moyenne de contact augmente au cours de la densification et la pression efficace, par conséquent, diminue.

Nous avons pensé à une nouvelle approche en considérant que les agrégats de poudres sont des EAD de poudres sphériques bidimensionnelles (des particules de rayons R_1 et R_2). Le but de notre travail est de trouver de nouvelles équations qui permettent d'évaluer les paramètres de densification, pour deux rayons différents, en fonction de la densité relative.

Les variations du nombre de coordination, de la surface moyenne de contact et de la pression efficace sont étudiées en deux étapes en fonction de la densité relative. La première étape, stade I, quand la densité relative D est comprise entre 0,64 et 0,92 et la deuxième étape, stade II, correspondant à une densité qui varie entre 0,92 et 1. Donc chaque paramètre va être exprimé par deux équations, chaque équation correspond à un stade.

Les équations obtenues nous ont permis de tracer des courbes représentant l'évolution de ces paramètres en fonction de la densité relative. Les figures obtenues révèlent de très bons résultats pour des rayons de particules relativement proches. En effet, notamment pour la surface de contact, notre approche a permis d'éliminer une diminution incohérente au niveau du passage du stade I au stade II. Cette diminution est aperçue dans les anciennes approches relatives aux EAD de particules sphériques de même dimension.

Enfin, il y a lieu de signaler que, comme perspectives, cette approche peut être utilisée pour l'étude des mécanismes de densification susceptibles d'être activés au cours du processus de densification de poudres par le frittage contraint tel que la compression isostatique à chaud.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- (Atkinson et Davies, 2000) H.V. Atkinson, S. Davies, *Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview*, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 31A, pp. 2981- 3000, 2000.
- (Arzt, 1982) E. Arzt, *The influence of an increasing particle coordination on the densification of spherical powders*, Acta Metallurgica, vol. 30, pp. 1883-1890, 1982.
- (Arzt et al., 1983) E. Arzt, M. F. Ashby, K.E. Easterling, *Practical applications of Hot Isostatic Pressing Diagrams: Four case studies*, Metallurgical transactions A, vol. 14A, pp. 211-220, 1983.
- (Azem, 2005) S. Azem, *Frittage réactionnel en phase liquide des mélanges ternaires W-(Co,Ni)-C*, Thèse de Doctorat, Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2005.
- (Baumann, 2000) P. Baumann, *Arrangements de boules dans l'espace*, Note à l'occasion de la Fête de la Science, Institut de Recherche Mathématique Avancée, Université Louis Pasteur et CNRS, France, 2000.
- (Bernache-Assollant et Bonnet, 2005) D. Bernache-Assollant, J-P. Bonnet, *Frittage : aspects physico- chimiques - Partie 2 : frittage en phase liquide*, Techniques de l'Ingénieur, 2005.
- (Bouvard, 2002) D. Bouvard, *Métallurgie des poudres*, Hermès Science Publications, Paris, 2002.
- (Cheng et al., 2000) Y. F. Cheng, S. J. Guo, H. Y. Lai, *Dynamic simulation of random packing of spherical particles*, Powder Technology, Vol. 107, pp. 123-130, 2000.
- (Chermant et al., 1986) J. L. Chermant, M. Coster, G. Giraud, J. P. Jernot, H. Robine, *Détermination du nombre de coordination dans un empilement de sphère à partir de sections planes aléatoires*, Journal de Physique, Vol. 47, pp. 829-837, 1986.
- (Eudier, 1994) M. Eudier, *Métallurgie des poudres, fabrication des produits frittés*, Techniques de l'Ingénieur, Vol. M3.II, N° M864, 1994.
- (Frachon, 2002) A. Frachon, *Modélisation et simulation numérique de la compression en matrice de poudres métalliques*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2002.
- (German, 1996) R. M. German, *Sintering theory and practice*, Ed. John Wiley and Sons, USA, 1996.
- (German , 1997) R. M. German, *Powder metallurgy science*, 2ème édition, Metal Powders Industries Federation, USA, 1997.
- (Guerin, 2004) V. Guerin, *Prédiction et compréhension de la densification des poudres commerciales d'alumine de fer grâce à une approche par réseau de neurones artificiels*, thèse, Faculté Science et Techniques de l'Ingénieur, Lausanne, 2004.
- (Haussonne et al., 2005) J-M Haussonne, C. Carry, P. Bowen, J. Barton, *Céramiques et verres : principes et techniques d'élaboration*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Suisse, 1^{ère} Edition, 2005.
- (He et Ekere, 1998) D. He, N. N. Ekere, *Computer simulation of powder compaction of spherical particles*, Journal of Materials Science letters, Vol. 17, pp. 1723-1725, 1998.
- (Helle et al., 1985) A.S. Helle, K.E. Easterling, M. F. Ashby, *Hot isostatic pressing diagrams: new developments*, Acta Metallurgica, vol. 33(12), pp. 2163-2174, 1985.
- (Hutchings , 2012) I. M. Hutchings, *Materials processing and design*, Note de cours 3C1: Engineering Tripos Part IIA, 2012.

- (Jerier, 2009) J.F. Jerier, *Modélisation de la compression haute densité des poudres métalliques ductiles par la méthode des éléments discrets*, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, France, 2009.
- (Kadiri, 2004) M. S. Kadiri, *Compression de poudres pharmaceutiques et interaction avec l'outillage : analyse expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- (Konak, 2003) A. Konak, S. Kulturel-Konak, A. E. Smith, I. Nettleship, *Estimation of shrinkage for near net-shape using a neural network approach*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 14, pp. 219-228, 2003.
- (Landau, 1967) L. Landau, E. Lifchitz, *Theory of elasticity*, Edition of Moscow, Tome VII, 1967.
- (Louet, 2003) N. Louet, *Influence du dopage à la silice ou à oxyde de calcium sur le frittage et sur l'évolution microstructurale d'une alumine-alpha ultra pure*, Thèse de Doctorat, Institut National des sciences appliquées de Lyon, France, 2003.
- (Olmos Navarrete, 2009) L. R. Olmos Navarrete, *Etude du frittage de poudres par microtomographie in situ et modélisation discrète*, Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, France, 2009.
- (Redouani, 2013) L. Redouani, *Nouvelle approche de la modélisation de la densification de poudres par compression isostatique à chaud*, Thèse de Doctorat, Université de Béjaia, Algérie, 2013.
- (Redouani et Boudrahem, 2012) L. Redouani, S. Boudrahem, *Hot isostatic pressing process simulation : application to metal powders*, Canadian Journal of physics, vol. 90, pp. 573-583, 2012.
- (Redouani et Boudrahem, 2015) L. Redouani, S. Boudrahem, *Simulation of the metal and ceramic powders densification Process by Hot Isostatic Pressing*, International Journal of Engineering Science and Innovative Technology, Vol. 4, Issue 3, pp. 171-180, 2015.
- (Redouani et al., 2019) L. Redouani, S. Boudrahem, S. Alem, *New hot isostatic pressing (HIP) simulation method with taking into account of the operating cycle ramp*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 102, pp. 3291-3299, 2019.
- (Swinkels et al., 1983) F. B. Swinkels, D. S. Wilkinson, E. Arzt, M. F. Ashby, *Mechanisms of hot isostatic pressing*, Acta Metallurgica, vol. 31(11), pp. 1829-1840, 1983.
- (Tossoukpe, 2013) H. Tossoukpe, *Modélisation et simulation du frittage de matériaux dopés et de multimatériaux à l'échelle de la microstructure*, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France, 2013.
- (Vandewalle, 2018) N. Vandewalle, *Matière Molle, Chapitre 3 : Matériaux granulaires*, Cours, Université de Liège, Belgique, 2018.
- (Vivoret et al., 2009) C. Vivoret, F. Radjai, J.-Y. Delenne, M. S. El Youssoufi, *Multiscale force networks in highly polydisperse granular media*, Physical Review Letters. Vol. 102, pp. 178001-178004, 2009.
- (www.astrosurf.com) <http://www.astrosurf.com/luxorion/Physique/masse-volumique-densite-materiaux.pdf>

RESUME

Résumé :

Dans ce travail, nous avons repris les modèles réalisés antérieurement pour l'étude de la densification des empilements aléatoires denses (EAD) de particules sphériques de même dimension pour les adapter aux EAD de particules sphériques bidimensionnelles. Nous avons ainsi développé une nouvelle approche microscopique qui permet d'évaluer les paramètres de densification des agrégats de poudres sphériques à deux dimensions en fonction de la densité relative en tenant compte des évolutions morphologiques des particules de poudre et de la porosité. Les équations obtenues pour chaque paramètre (nombre de coordination, surface moyenne de contact et pression efficace) ont permis de représenter les résultats sous forme de courbes. Celles-ci montrent que notre approche est bien adaptée pour une description réaliste de la densification des agrégats de poudres avec des particules de tailles plus ou moins proches.

Abstract:

In this work, we have taken up models previously realized for the study of densification of dense random packing (DRP) of spherical particles of the same dimension to adapt them to the DRPs of two-dimensional spherical particles. We have therefore developed a new microscopic approach that allows us to evaluate the densification parameters of two-dimensional spherical powders as a function of relative density taking into account the morphological evolution of the powder particles and the porosity. The obtained equations for each parameter (coordination number, average contact area and effective pressure) make it possible to represent the results in the form of curves. These show that our approach is well suited for a realistic description of powder aggregates densification with particles of more or less similar size.

ملخص:

في هذا العمل، أخذنا نماذج تم تحقيقها سابقاً لدراسة تكثيف المجاميع العشوائية الكثيفة (EAD) من الجسيمات الكروية ذات البعد نفسه لتكييفها مع EADs للجسيمات الكروية ثنائية الأبعاد. لذلك قمنا بتطوير طريقة مجهرية جديدة تتيح لنا تقييم خصائص التكثيف للمساحيق الكروية ثنائية الأبعاد كدالة للكثافة النسبية مع مراعاة التطور المورفولوجي لجزيئات المسحوق والمسامية. المعادلات التي تم الحصول عليها لكل معلمة (رقم التنسيق ، متوسط سطح الاتصال والضغط الفعال) تجعل من الممكن تمثيل النتائج في شكل منحنيات. هذه توضح أن مقاربتنا مناسبة تماماً للحصول على وصف واقعي لتكثيف مسحوق المجاميع مع جزيئات متشابهة أو أقل.