POLYPUBLIE

Étude du comportement microstuctural d'une poudre de fer au cours du pressage

Sorin Scumpu

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	1999
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/8847/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Scumpu, S. (1999). Étude du comportement microstuctural d'une poudre de fer au cours du pressage [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8847/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Sylvain Turenne
Programme Program	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DU COMPORTEMENT MICROSTRUCTURAL D'UNE POUDRE DE FER AU COURS DU PRESSAGE

SORIN SCUMPU

DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE ET DE GÉNIE DES MATÉRIAUX

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉTALLURGIQUE)
AOÛT 1999

© Sorin SCUMPU, 1999.

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre reference

Our file Notre reference

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-53602-5

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE DU COMPORTEMENT MICROSTRUCTURAL D'UNE POUDRE DE FER AU COURS DU PRESSAGE

Présenté par: SCUMPU Sorin

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. L'ESPÉRANCE Gilles, Ph.D., président

M. TURENNE Sylvain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. THOMAS Yanning, Ph.D., membre

À ma famille

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à mon directeur de recherche M. Sylvain Turenne pour les suggestions, les recommandations et les orientations particulièrement utiles qu'il a bien voulu m'accorder tout au long de la période de l'élaboration de la présente étude. M. Sylvain Turenne a non seulement contribué au projet par ses conseils mais aussi par son aide financière sans laquelle ce projet n'aurait pu être réalisé.

Je tiens à remercier aussi Carole Massicotte et Josée Laviolette pour tout leur appui compétent et aimable pendant les déterminations expérimentales.

Je ne pourrais omettre non plus les conseils reçus de la part du professeur Liviu Nicolescu de l'Université de Bucarest. Merci beaucoup !

Je ne voudrais pas oublier ma mère. Sa confiance et ses encouragements m'ont beaucoup aidé pendant ces années. Merci Maman ! Un merci spécial à ma sœur Camelia pour l'apport tout particulier qu'elle m'a accordé dans l'élaboration de ce projet.

Enfin, un gros merci à mes amis. Ils sont restés à côté de moi, même si je les ai souvent négligés pendant mes années d'études. Pour cela, je leur en suis très reconnaissant.

RÉSUMÉ

Le procédé de mise en forme par pressage de poudres en matrice rigide mène à l'obtention de pièces à vert poreuses. Comme les propriétés mécaniques dépendent grandement de la porosité, il est toujours nécessaire de consolider les pièces par un frittage qui a entre autres pour effet de réduire la porosité. Afin de minimiser les distorsions lors du frittage, il est préférable d'avoir une densité à vert la plus uniforme possible d'un point à l'autre de la pièce. À cause du frottement présent aussi bien entre les particules qu'entre celles-ci et les parois de la matrice de pressage, la pression appliquée par le poinçon ne se transmet pas d'une manière uniforme. L'effet du gradient de pression dans le volume de poudre se manifeste par une déformation inégale des particules dans le volume du comprimé, avec l'apparition comme conséquence de zones à densités différentes. La distribution de densité dans le volume du comprimé est attribuée à de nombreux facteurs. Ceci explique pourquoi une modélisation complète du processus de densification est très difficile. Les facteurs qui jouent un rôle dans le processus de pressage peuvent être divisés en trois catégories distinctes: a) facteurs qui

caractérisent le matériau : dureté, plasticité, etc., b) facteurs qui caractérisent la poudre: forme, dimension, porosité, homogénéité des dimensions des particules etc., c) variables expérimentales qui caractérisent le processus de mise en forme: pression, lubrification, temps de pressage, température de pressage, forme et dimensions du comprimé, etc.

En utilisant la poudre de fer, on s'est proposé dans cette étude d'analyser l'influence de certaines variables des catégories b et c sur le processus de densification. La variation de densité dans le volume du comprimé a été évaluée comme effet de la déformation des particules. Celle-ci a pu être mesurée microscopiquement, en définissant un facteur de forme qui tient compte des modifications des dimensions des particules dans des zones précises du comprimé. Ces zones ont été choisies pour pouvoir mettre en évidence la variation de déformation des particules sur la surface d'une section médiane dans les comprimés à vert.

On a constaté des variations de densité en fonction de la poudre utilisée, de la pression, du type de lubrification et de la zone d'intérêt dans laquelle le facteur de forme a été déterminé. Ainsi, à proximité du poinçon mobile dans le plan horizontal du comprimé, une augmentation radiale du facteur de forme, du centre vers l'extrémité, a été constatée. Vers la face inférieure du comprimé l'évolution du facteur de forme est contraire. À mesure que la dimension des particules diminue, les différences entre les valeurs des facteurs de forme mesurées en différents endroits sur la section ont été moins importantes.

L'utilisation du stéarate de zinc pour la lubrification de la poudre n'a pas éliminé en totalité les gradients de densité sur la section du comprimé à vert. Par ailleurs, il a contribué favorablement à l'uniformisation de la déformation des particules de poudre pressée. D'un autre côté, la fine couche de graphite déposée sur les parois de la matrice de pressage dans le but de faciliter l'extraction du comprimé de la matrice a eu également l'effet de lubrifier les particules de poudre. Ainsi, on a constaté une différence plus accentuée entre les valeurs du facteur de forme mesurées dans les régions centrales non-lubrifiées du comprimé et celles au voisinage des parois de la matrice.

Le but final visé a été d'obtenir une relation reliant les valeurs moyennes des facteurs de forme mesurés dans des différentes régions de la section médiane d'un comprimé à la densité moyenne mesurée expérimentalement. En utilisant les valeurs expérimentales obtenues dans cette étude, on a confirmé que le modèle théorique proposé donne une prédiction de la densité moyenne valable.

ABSTRACT

The forming process of powder pressing in rigid dies leads to the manufacturing of porous green parts. Since the mechanical properties are highly dependent on the porosity, it is always necessary to consolidate the parts by sintering, which among other effects reduces the porosity. In order to minimize distortions occurring during the sintering process, it is preferable to have the most uniform green density from one point to the other in the part.

Because of the friction present between either the particles themselves or the particles and the die walls, the pressure applied by the punch is not uniformly transmitted. The effect of the pressure gradient in the volume of powder results in an unequal deformation of particles within the volume of green compact, and consequently, of different density zones. The density distribution within the green compact volume is due to many factors. This explains why a complete modeling of the densification process is very difficult. The factors which are involved in the pressing process may be divided in

three different categories: a) factors characterizing the material: hardness, plasticity, etc., b) factors characterizing the powder: shape, size, porosity, granular homogeneity of particles etc., c) experimental variables characterizing the forming process: pressure, lubrication, pressing time, pressing temperature, compact shape and size, etc.

The aim of the present study was to analyze the influence of certain variables like the previous b and c categories on the densification process by using iron powder. The density variation within the green compact volume was evaluated from the particle deformation. This could be measured microscopically by defining a shape factor, which describes the modification of particle size within precisely located zones of the compact. These zones have been chosen to highlight the variation of particles' deformation on the middle section of the green compact.

We found density variations depending on the type of powder used, on the compacting pressure, on the type of lubrication mode and on the interest zone where the shape factor was determined. In the proximity of the horizontal plane of the compact, a radial increase of the shape factor from the center to the extremities was noticed. Towards the bottom of the die the evolution of the shape factor was opposite. As the dimension of particle decreases, the differences between the values of the shape factors measured in different places were less important.

The use of zinc stearate for powder lubrication did not totally eliminate the density gradients into the green compact. However, it contributes favorably to the uniformity of powder particles deformation. On the other hand, the thin graphite coat laid on the pressing die walls in order to facilitate the extraction of the compact from the die had also the effect to lubricate the powder particles. A more pronounced difference between the values of the shape factor measured within the unlubricated central regions and those near the die walls was observed.

The final goal of the study was to obtain a relation between the mean values of the shape factors measured on different regions of the median section of a green compact and the average density determined experimentally. The resulting relation was validated through a very good prediction of the average density of a cylindrical part pressed in different conditions by analyzing the local shape factor.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vii

ABSTRACT x

TABLE DES MATIÈRES xiii

LISTE DES TABLEAUX xvi

LISTE DES FIGURES xvii

LISTE DES ANNEXES xxiii

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 - PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS PUBLIÉS 6

1.1. Étapes de densification 6

1.2. Équations de densification 15

1.3. Distribution des contraintes et de la densité dans les comprimés à vert 24

1.4. Caractérisation des gradients de densité 31

CHAPITRE 2 – MÉTHODOLOGIE ET ÉLABORATION DES HYPOTHÈSES.55

2.1. Méthodologie 55

2.2. Facteur de forme 58

CHAPITRE 3 – MÉTHODE EXPÉRIMENTALE 63

3.1. Classification dimensionnelle de la poudre.....63

3.2. Détermination de la vitesse d'écoulement et de la densité apparente 69

3.3. Mélange de la poudre 71

3.4. Lubrification de la poudre 72

3.5. Détermination de la densité tassée 74

3.6. Pressage de la poudre 75

3.7. Préparation des échantillons pour l'analyse d'images 81

3.7.1. Échantillons imprégnés 81

3.7.2. Échantillons pressés 83

3.8. Prise de photographies 86

3.9. Analyse d'images 89

CHAPITRE 4 – RÉSULTATS ET DISCUSSION **92**

4.1. Critique du programme d'analyse d'images **92**

4.2. Poudre tassée **98**

4.3. Poudre comprimée **104**

4.3.1. Détermination du facteur de forme **104**

4.3.2. Effets du pressage **119**

4.4. Modélisation **125**

4.4.1. Détermination de C **129**

4.4.2. Validation de la méthode **132**

CONCLUSION **138**

BIBLIOGRAPHIE **141**

ANNEXES **150**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. L'effet des lubrifiants sur la densité à vert d'un comprimé de Ni pressé à 414 MPa (30 tsi) **33**

Tableau 3.1. Caractéristiques de la poudre de fer étudiée..... **65**

Tableau 3.2. Distribution de tailles d'une poudre tamisée..... **67**

Tableau 3.3. Valeurs de la densité apparente et de l'écoulement pour six classes dimensionnelles obtenues par tamisage d'une poudre de fer (Atomet 1001)..... **70**

Tableau 3.4. Calcul de la densité tassée pour les trois catégories de poudre utilisées.... **75**

Tableaux 3.5. Caractéristiques des comprimés à vert..... **76**

Tableau 4.1. Analyse du facteur de forme de la poudre tassée..... **101**

Tableaux 4.2. Valeurs du facteur de forme sur les sections des comprimés à vert **106**

Tableau 4.3. Déformation relative maximale des particules (section longitudinale) pour chacune des classes de poudre étudiées..... **118**

Tableau 4.4. Valeurs calculées de C pour les trois classes de poudre utilisées..... **130**

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1. Étapes de fabrication des pièces par les procédés de la métallurgie des poudres..... **2**

Figure 0.2. Composition des coûts d'une pièce de pompe réalisée par les méthodes de la métallurgie des poudres et de l'usinage classique..... **3**

Figure 1.1. Comportement des particules pendant la densification..... **7**

Figure 1.2. Évolution du comprimé pendant le pressage uniaxe dans une matrice métallique rigide..... **8**

Figure 1.3. Courbe de densification Pression [MN/dm^2] - Densité [g/cm^3]. **9**

Figure 1.4. Variation du nombre moyen de particules sphériques localisées à la distance r de la sphère de référence de rayon R. **11**

Figure 1.5. Variation entre la densité relative et le rapport entre la pression appliquée et la limite d'écoulement. **13**

Figure 1.6. Distribution du nombre de particules (N) en s'éloignant d'une particule sphérique de référence de rayon R. **16**

Figure 1.7. Schéma représentant la déformation d'une particule sphérique **17**

Figure 1.8. Schéma représentant la déformation d'une particule dans un ensemble comprimé sous l'action de la pression P. **20**

Figure 1.9. Dépendance générale de la densité du comprimé à vert au pressage. **25**

Figure 1.10. Variation de la pression relative P/P_0 en fonction des paramètres de densification $\frac{\mu \varepsilon x}{D_c}$ **27**

Figure 1.11. Iso - valeurs de pression (MPa) dans un comprimé de cuivre pressé à 700 MPa..... **27**

Figure 1.12. Variation de densité dans un comprimé cylindrique de poudre de Ni pur. **28**

Figure 1.13. Iso - valeurs de densité dans un comprimé de poudre pour le pressage uniaxe simple action et double action. **29**

Figure 1.14. Radiographie d'une grille de plomb à ouvertures carrées équidistantes utilisée pour l'évaluation quantitative de la distribution de densité..... **34**

Figure 1.15. Radiographie d'une grille à ouvertures circulaires dans un comprimé de poudre pressé en mode double action à 155 MPa (22400 psi). **35**

Figure 1.16. Dépendance de la déformation plastique des particules individuelles en fonction de la pression de densification (tsi) pour une poudre atomisée de fer..... **36**

Figure 1.17. Variation de la dureté Rockwell (HRB) avec la densité relative pour une poudre d'acier alliée poreuse (type HF4, Mannesmann)..... **38**

Figure 1.18. Iso-valeurs de densité obtenues par la détermination de dureté et par analyse d'image sur une section transversale d'un échantillon pressé isostatique à froid à 3 t / cm^2 (300 MPa), fritté et déformé à $\varepsilon = 0.67$..... **39**

Figure 1.19. Schéma de principe pour la mesure du distribution de densité d'un comprimé de poudre métallique par la mesure de la vitesse des ultrasons **41**

Figure 1.20. Section schématique dans le montage pour réaliser des mesures ultrasoniques en utilisant comme agent de couplage une membrane de plastique sous vide..... **43**

Figure 1.21. Schéma de montage pour réaliser des mesures ultrasoniques en utilisant comme agent de couplage une bande adhésive..... **43**

Figure 1.22. Variation de la vitesse d'onde (dans différents endroits) dans un échantillon d'alumine pressé à 68,9 MPa..... **45**

Figure 1.23. Variation de densité dans des directions axiale et transversale dans un échantillon pressé simple action à 68,9 MPa (résultats obtenus par radiographie à rayons X)..... **46**

Figure 1.24. Distribution de densité relative dans des comprimés de poudre de dioxyde d'uranium non – lubrifié dont le rapport H / D a été modifié..... **49**

Figure 1.25. Images d'un comprimé de poudre d'oxyde de zinc obtenues par tomographie avec des rayons X. a) comprimé à vert pressé à 6.0 MPa; b) comprimé fritté 60 min à 1000 °C..... **50**

Figure 1.26. Exemple d'image obtenue par section dans un échantillon..... **52**

Figure 1.27. Réalisation d'une image en 3-D utilisant les images en 2-D obtenues par une série de tranches..... **52**

Figure 1.28. Modification de la structure entre deux plans de coupe qui fournit des ambiguïtés dans l'interprétation en 3-D..... **53**

Figure 2.1. Particule de poudre de fer atomisée..... **59**

Figure 2.2. Plan de section aléatoire dans une particule de forme ellipsoïdale. **61**

Figure 2.3. Mesure du facteur de forme, $\Phi = \frac{a}{b}$..... **62**

Figure 3.1. Les étapes de l'analyse **64**

Figure 3.2. Distribution cumulative de taille des particules en fonction du pourcentage en pois de poudre retenue..... **68**

Figure 3.3. Distribution de taille (log-normale) pour l'échantillon de poudre de fer **68**

Figure 3.4. Variation entre la pression de pressage et la densité à vert obtenue pour six classes de poudre tamisée..... **80**

Figure 3.5. : Photographie d'une poudre (+106 / -150 μm) tassée et imprégnée (échantillon coupé et poli). **83**

Figure 3.6. Photographie d'un comprimé à vert sectionné dans la région médiane par un plan parallèle à la direction de pressage, préparé pour analyse d'images. .**86**

Figure 3.7. Disposition des zones d'intérêt dans l'échantillon sur le plan de section longitudinale (a) et sur le plan de section transversale (b). Application de la pression selon l'axe z. **87**

Figure 3.8. Identification des particules pour la mesure du facteur de forme par analyse d'images..... **91**

Figure 4.1. Ensemble de particules de poudre sphériques..... **93**

Figure 4.2. Sections dans une particule sphérique..... **96**

Figure 4.3. : Échantillons sectionnés et polis de poudre (a) de classe 1, (b) de classe 2 et (c) de classe 1+2 sur lesquels ont été réalisés des mesures du facteur de forme. **100**

Figure 4.4. Représentation schématique des sections et les endroits de mesure du facteur de forme. **109**

Figure 4.5.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre lubrifiée de classe 1 (+106 μm / -150 μm) ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi)..... **110**

Figure 4.6.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre non-lubrifiée de classe 1 (+106 μm / -150 μm) ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi)..... **111**

Figure 4.7 : Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre lubrifiée de classe 2 (+45 μm / -75 μm) ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi)..... **112**

Figure 4.8.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre non-lubrifiée de classe 2 (+45 μm / -75 μm) ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi)..... **113**

Figure 4.9.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre lubrifiée de mélange de poudres ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi)..... **114**

Figure 4.10.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre non-lubrifiée de mélange de poudres ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi)..... **115**

Figure 4.11. Variation de densité entre l'état initial (tassé) et celle obtenue a l'état *x* pendant le pressage..... **127**

Figure 4.12. Variation avec la pression du paramètre C pour l'état lubrifié et non-lubrifié de trois catégories de poudre : classe 1 (+ 106 μm / - 150 μm), classe 2 (+ 45 μm / - 75 μm) et classe 1 + 2..... **131**

Figure 4.13. Comprimé à vert; plan de section et volumes élémentaires **133**

Figure 4.14. Section dans un comprimé cylindrique et distribution des zones d'intérêt pour le calcul du facteur de forme. **135**

Figure 4.15. Valeurs moyennes du facteur de forme mesurées sur une section médiane parallèle à l'axe de pressage du comprimé cylindrique..... **135**

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 - Résultats du tamisage de la poudre de Fe ATOMET.....**151**

Annexe 2 - Calcul des valeurs moyennes du facteur de forme pour la poudre de classe 1 tassée.....**161**

Annexe 3 - Calcul des valeurs moyennes du facteur de forme pour la poudre de classe 2 tassée.....**167**

Annexe 4 - Calcul des valeurs moyennes du facteur de forme pour la poudre de classe 1 + 2 tassée.....**177**

Annexe 5 - Distribution schématique du facteur de forme sur les sections du comprimé à vert.....**182**

Annexe 6 - Calcul du facteur de forme des zones de référence des comprimés à vert.....**206**

INTRODUCTION

Le pressage de poudres métalliques permet d'obtenir des pièces à propriétés particulières à partir de poudres de métaux purs ou de certains mélanges spécifiques. Le procédé d'obtention des pièces contient en général cinq étapes distinctes : 1) l'élaboration des poudres métalliques par des méthodes mécaniques, chimiques ou physiques ; 2) la préparation des mélanges de poudres ; 3) le pressage ; 4) le frittage ; et 5) les opérations secondaires incluant les traitements thermiques, l'usinage, les traitements de surface, etc. La figure 0.1 présente en détail les étapes de fabrication des pièces par les procédés de la métallurgie des poudres.

La métallurgie des poudres est utilisée principalement en vue de l'obtention de pièces dont les propriétés ne peuvent être obtenues que par ce moyen. Un deuxième raison d'utilisation les méthodes spécifiques de la métallurgie des poudres est d'obtenir des pièces frittées avec des propriétés correspondantes, dans les conditions où il y a un avantage économique par rapport aux méthodes classiques de mise en forme.

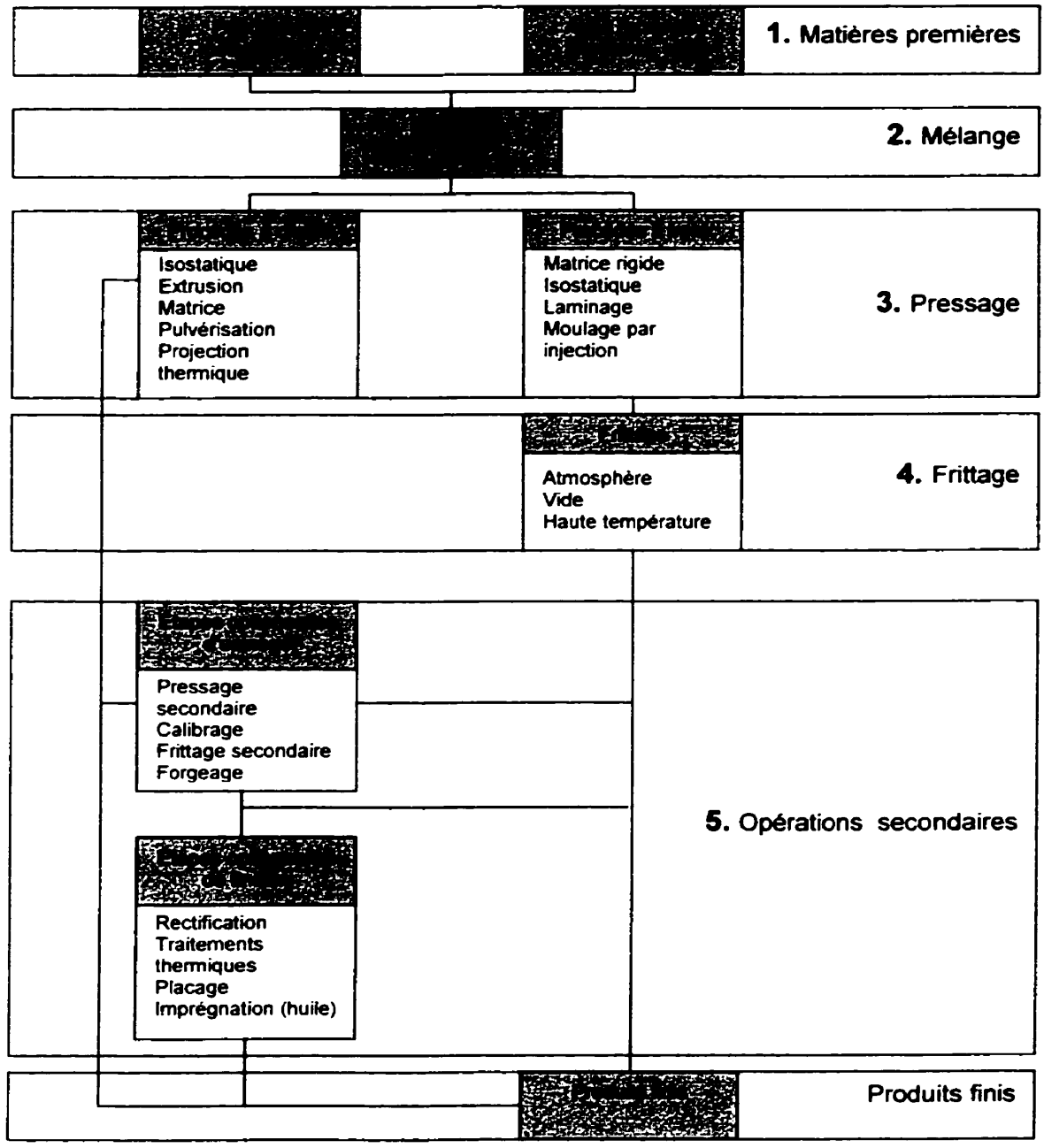


Figure 0.1 Étapes de fabrication des pièces par les procédés de la métallurgie des poudres

L'utilisation à grande échelle de la méthode de mise en forme par la métallurgie des poudres se justifie principalement par les avantages économiques. Par les méthodes de la métallurgie des poudres on peut obtenir des pièces avec un excellent contrôle de la microstructure tout en évitant le gaspillage de matière. L'automatisation des procédés permet une meilleure productivité donnant des conditions économiques avantageuses, en particulier pour de grandes quantités de pièces à réaliser. La figure 0.2 présente une comparaison des éléments du coût de fabrication d'une pièce de pompe à l'huile réalisée par les méthodes de la métallurgie des poudres et de l'usinage classique [SUR 84].

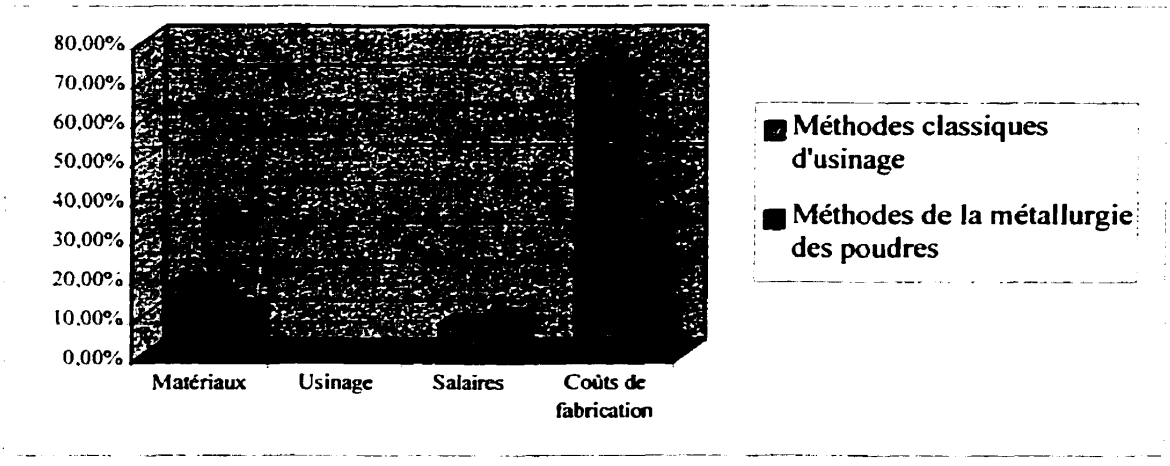


Figure 0.2. Composition des coûts d'une pièce de pompe réalisée par les méthodes de la métallurgie des poudres et de l'usinage classique.

Bien qu'attrayants d'un point de vue technique et économique, les procédés de la métallurgie des poudres sont accompagnés malheureusement par des problèmes de non-uniformité de densité dans le volume du comprimé à vert. Ce phénomène est lié à un gradient de la pression, dû à un phénomène de friction entre les particules de poudre comprimées. La friction réciproque entre les particules de poudre pressées et entre les particules et les parois de la matrice de pressage ne peut pas être éliminée complètement. Le but final est d'obtenir une densité uniforme dans tout le volume du comprimé à vert, c'est pourquoi on essaye par différents moyens (choix de poudre utilisée, choix des dimensions du comprimé, choix de lubrification, etc.) de réduire la friction le plus possible.

Le contrôle de la densité est très important car son effet sur les propriétés mécaniques des pièces à vert et frittées est majeur. D'un point de vue mécanique, l'uniformité de densité est importante pour conserver l'intégrité de la pièce à vert lors de l'éjection de la matrice et pour la manutention pendant les étapes subséquentes du procédé. De plus, le rétrécissement du comprimé ainsi que sa densification pendant le frittage sont fortement influencés par la densité à vert du comprimé, une variation de celle-ci menant à des modifications importantes des formes et des propriétés de pièces frittées. Par conséquent, il est très important de connaître et comprendre le comportement des poudres pendant le pressage pour prévoir leur mécanisme de densification et les effets engendrés sur les propriétés des pièces frittés.

Cette étude est divisée en quatre chapitres dont le premier présente une discussion des publications parues. Le cadre théorique et l'élaboration des hypothèses servent à la définition des bases expérimentales pour les conditions et les limitations de réalisation des tests. Dans le chapitre sur la méthodologie de travail, on décrit en détail la procédure pratique de réalisation des expériences et des mesures ainsi que le traitement des valeurs obtenues. Les discussions et l'interprétation des résultats qui ont été abordés dans le quatrième chapitre permettent d'établir le lien entre les hypothèses, les résultats publiés dans la littérature et ceux obtenus à la suite des tests.

CHAPITRE 1

PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS PUBLIÉS

1.1. Étapes de densification

Essentiellement, le procédé de mise en forme de pressage de poudres consiste à soumettre la poudre métallique à l'influence de la pression et de la température, le plus souvent dans des opérations successives mais aussi, parfois, simultanément. Afin d'obtenir de tels produits, dans une première étape les mélanges homogènes de poudre sont comprimés dans des matrices qui peuvent être soit métalliques avec sollicitation uniaxe, soit des matrices flexibles pour le pressage isostatique. L'étape qui suit immédiatement est celle du frittage permettant aux pièces d'accéder à des propriétés fonctionnelles, de structure et de résistance désirées.

En revenant à l'étape de pressage des poudres, le processus évolutif de densification en réponse à une augmentation de pression dans une matrice rigide, conduit à une succession d'événements conformément au diagramme suivant [TUR 97, TUR 98]:

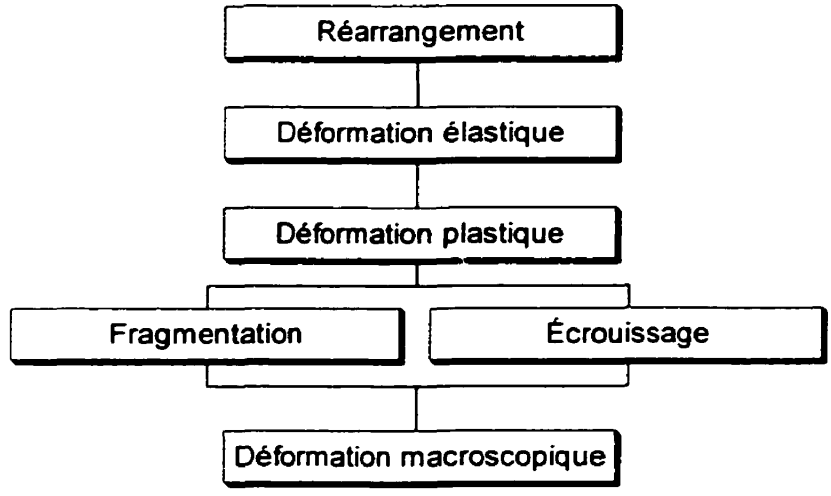


Figure 1.1. Comportement des particules pendant la densification

Il faut tenir compte que dans le processus de pressage uniaxe des poudres, on ne transmet pas la pression de façon hydrostatique dans toute la quantité de poudre. Soit, par exemple, la situation du pressage unidirectionnel à simple action dont la matrice et le poinçon inférieur sont fixes (figure 1.2.). Le nombre de particules de poudre influencées par l'action de la pression générée par le déplacement du poinçon supérieur sera de plus en plus grand [SUR 84].

La densité initiale dans des conditions de pression zéro correspond à la situation de la poudre après le remplissage de la matrice (densité apparente). À mesure qu'on augmente

la pression, les particules situées dans certains endroits du volume supporteront différents états de contraintes, le premier effet étant le réarrangement des particules de poudre. Pendant le déplacement de la poudre sous l'action de la pression, chaque particule a tendance à éviter la pression qui s'exerce sur elle, en se déplaçant dans le sens de la résistance minimale. L'effet d'un tel comportement s'identifie dans deux phénomènes: i) une croissance de la densité de l'arrangement de poudre vers des valeurs de densité s'approchant de celle du métal dense et ii) une décroissance du taux (de la vitesse) de densification.

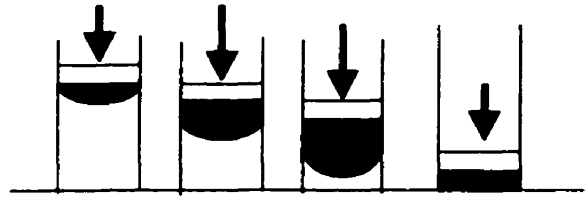


Figure 1.2. Évolution du comprimé pendant le pressage uniaxe dans une matrice métallique rigide.

Plusieurs auteurs ont suggéré que la densification des poudres puisse être considérée comme un processus en plusieurs étapes. Selon Seeling et Wulff [SEE 46], le comportement décrit par la courbe de la figure 1.3. peut être considéré comme ayant une évolution suivant trois stades (ou quatre stades [GER 89]) qui ne sont pas obligatoirement distincts, ceux-ci pouvant se chevaucher.

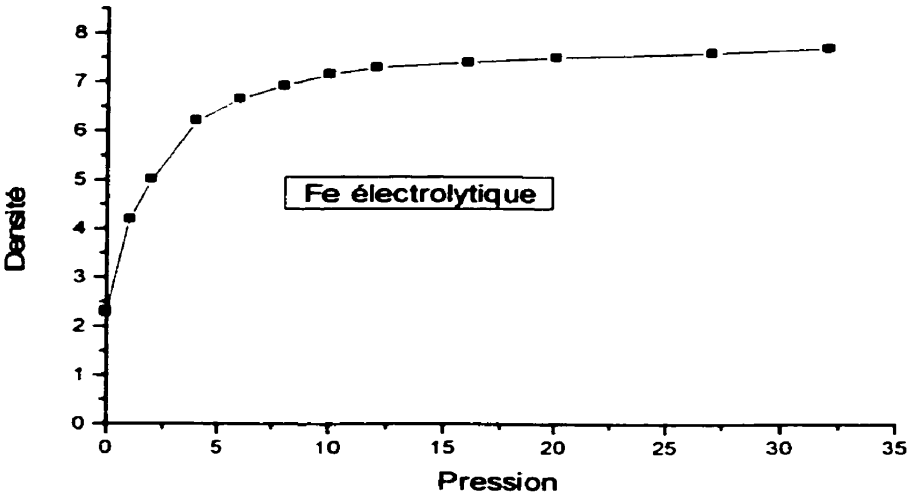


Figure 1.3. Courbe de densification Pression [MN/dm^2] - Densité [g/cm^3], [GAD 82].

On a suggéré que le premier stade correspond à un réarrangement pur, processus qui se passe sans déformation plastique, l'arrangement de particules ayant initialement une densité relative typique d'un arrangement aléatoire. À mesure que la pression augmente, la poudre passe d'un arrangement désordonné à un arrangement plus tassé.

Dans ce stade, la densité relative de même que le nombre de contacts entre les particules de poudre augmentent pour de faibles valeurs de pression [GER 89, HIR 69, JON 60]. Ainsi, la quantité de réarrangement (la densification) est inversement proportionnelle à la densité relative initiale. Parmi les facteurs importants qui influencent la densité relative initiale on peut mentionner la dimension des particules et la forme des particules. Plus la dimension des particules augmente, plus le nombre de contacts dans

un volume unitaire entre celles-ci se réduit. Par conséquent, le frottement entre les particules diminue et leur réarrangement est favorisé.

La forme des particules est rarement sphérique, ce qui influence le processus de réarrangement. Pour les poudres ayant des particules de formes irrégulières et de matériaux métalliques difficiles à déformer, l'effet du réarrangement est plus accentué [KOS 68]. Randall M. German [GER 89] constate à son tour que plus la forme de la particule est irrégulière, plus la densité apparente de la poudre diminue. Par conséquent, le changement de densité par le réarrangement des particules est plus évident pour des poudres ayant des densités apparentes plus réduites.

Le comportement des poudres dans ce stade est aussi différent en fonction des caractéristiques du matériau dont la poudre provient. Ainsi, l'augmentation de la densité est limitée à un pourcentage réduit pour les poudres ductiles à la forme relativement régulière et à surface lisse [FIS 78, KAK 68, BOC 66, DON 63, DUF 54].

Le réarrangement peut être défavorisé et même peut disparaître totalement dans le cas où la densité initiale de la poudre est suffisamment élevée pour que la moindre augmentation de pression engendre la déformation plastique des particules [MOO 85], situation plus facilement observable pour les poudres de cuivre mais moins visible pour celles de fer.

En partant de la condition simplificatrice que la poudre est constituée de particules sphériques et uniformes, ce phénomène peut être calculé [FIS 83] en utilisant la fonction de distribution radiale (RDF = "Radial Density Function") :

$$G(r) = Z_0 + c\left(\frac{r}{2R} - 1\right) \qquad (1)$$

Cette fonction donne le nombre moyen de particules dont le centre de masse est situé à l'intérieur d'une distance radiale r d'une particule arbitraire de rayon R, ou, plus précisément, le nombre de centres de sphère localisés à la distance r de la sphère de référence (figure 1.4.). Le paramètre Z_0 est le nombre de coordination pour un arrangement aléatoire des particules (Z_0 = 7,3) et c est la pente de la fonction RDF (c = 15,5) [FIS 83].

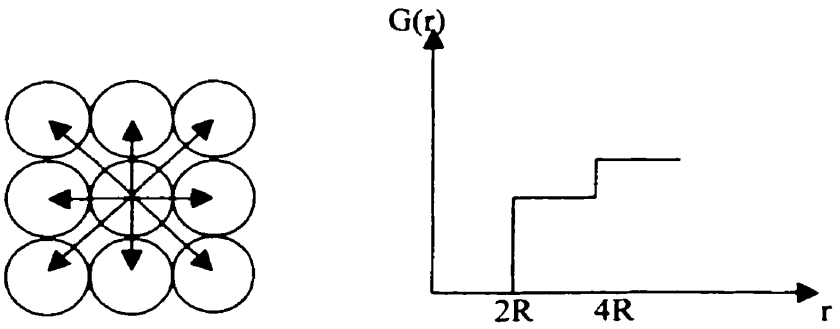


Figure 1.4. Variation du nombre moyen de particules sphériques localisées à la distance r de la sphère de référence de rayon R. [FIS 83].

Une fois fini le réarrangement des particules avec l'augmentation de la pression appliquée, on commence à observer la déformation des particules de poudre. C'est le moment du passage à la seconde étape de la densification qui, comme on l'a déjà mentionné, peut se superposer partiellement à la première étape. Initialement, à des valeurs faibles de pression, il ne s'agit que d'une déformation élastique des points de contact entre les particules [TUR 97, GER 89, FIS 78, HIR 69] ce qui entraîne la réduction des zones vides dues à la forme sphérique des particules.

En même temps avec l'augmentation de la pression on constate un glissement et un aplatissement simultané des particules, donc une modification de leur forme. Il est évident que cet aplatissement se produit avec l'augmentation, d'un côté, des surfaces de contact entre les particules (surfaces qui étaient initialement des contacts en un point) et, de l'autre côté, du nombre de coordination (nombre des points de contact sur chaque particule) [FIS 78, HEW 74]. En présentant dans la figure 1.5. [GER 89] la variation de la densité relative en fonction du rapport entre la pression appliquée et la limite d'écoulement pour des poudres de différents matériaux (Ni, Cu, W, Fe) on constate un comportement semblable pour toutes les particules, c'est à dire une augmentation de la densité relative avec l'augmentation du rapport entre la pression appliquée et la limite d'écoulement. Par contre, les dimensions des surfaces de contact entre les particules

déformées seront sensiblement différentes aussi bien pour différents types de poudres métalliques utilisées que pour différentes pressions appliquées.

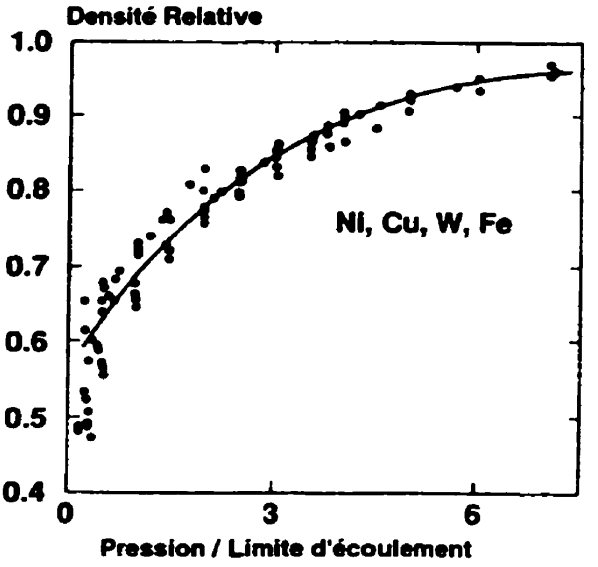


Figure 1.5. Variation entre la densité relative et le rapport entre la pression appliquée et la limite d'écoulement [GER 89].

Pour des valeurs plus élevées de pression, le déplacement réciproque des particules cesse et la densification continue par l'élargissement des surfaces de contact (déformation plastique). La concentration de la pression dans les points de contact provoque un écoulement de la matière dans les pores voisins, ayant comme effet la diminution des dimensions des pores et l'augmentation de la densité du comprimé. Simultanément peut apparaître aussi une soudure froide des particules de poudre sur les surfaces de contact, ayant comme conséquence le renforcement de la résistance du comprimé. Pour le cas

particulier des particules uniformes et sphériques, la déformation des particules entraîne la transformation de celles-ci en polyèdres [TUR 98, GER 94, GER 89, FIS 78, HIR 69].

La conséquence de la déformation des particules de poudre est l'écrouissage progressif de celles-ci à mesure que leur déformation augmente ayant comme effet la réduction de la plasticité et implicitement la fragmentation des particules. Cette fragmentation se produit au moment où les contraintes dans les particules sont devenues si élevées que la limite de rupture du matériau est atteinte. Ce phénomène apparaît surtout dans le cas des matériaux ayant une plasticité limitée ou dans le cas des poudres poreuses qui ont des formes irrégulières.

Le troisième stade de la densification est caractérisé par des densités très élevées, lorsque le caractère particulier de chaque particule disparaît en entraînant la déformation de l'ensemble comme un tout unitaire et la compressibilité de l'ensemble diminue rapidement.

1.2. Équations de densification

En considérant l'ensemble du processus de densification de la poudre commençant par le remplissage de la matrice et finissant par l'extraction du comprimé, le processus est évolutif, caractérisé par une superposition des stades, sans qu'il ait des "zones" nettement délimitées. Cependant, chaque stade est distinct du point de vue phénoménologique, ayant comme caractéristiques certains changements qui peuvent être définis par des équations spécifiques.

Jusqu'à présent on a conçu relativement peu d'études sur le stade de réarrangement des particules, probablement à cause de l'hypothèse des nombreux auteurs conformément à laquelle le premier stade de la densification n'aurait pas d'influence sur le pressage ultérieur. Les études expérimentales qui ont été pourtant réalisées décrivent l'évolution de la distribution radiale en fonction du nombre des contacts N_c entre les particules sphériques. Une conclusion quasi générale est que la relation entre les deux peut être approchée par une "sinusoïde amortie" (figure 1.6.).

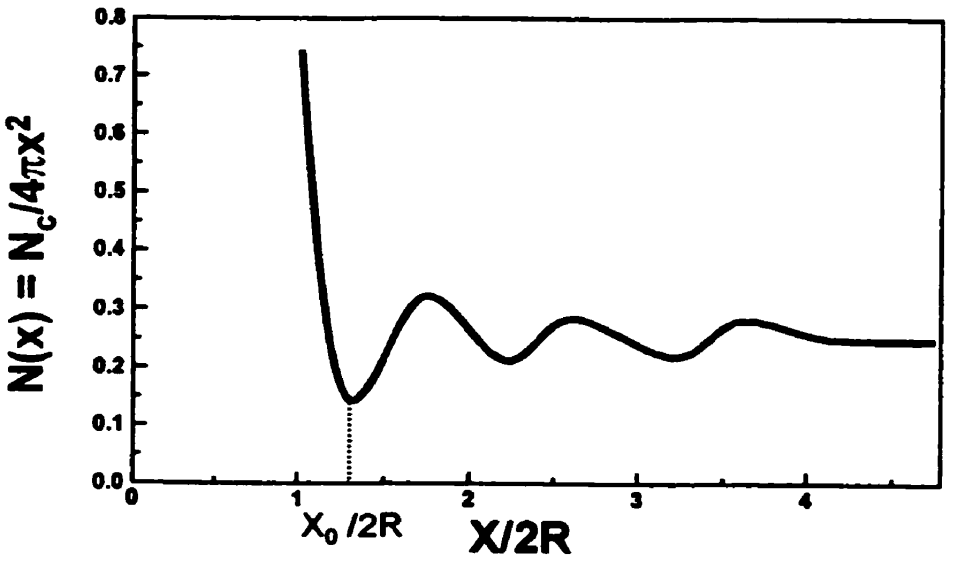


Figure 1.6. Distribution du nombre de particules (N) en s'éloignant d'une particule sphérique de référence de rayon R. [TUR 98].

Dans le second stade se produit une densification importante des particules de poudre associée à une augmentation sensible de la pression. L'évolution de certains paramètres caractérisant le processus de densification a été décrite par divers modèles. Ainsi, on a déterminé des modèles qui décrivent la variation du nombre de contacts à la surface des particules durant la densification [GER 89, FIS 78]. D'autres modèles décrivent l'influence de la pression qui provoque l'aplatissement des particules (supposées sphériques) de poudre. On a développé aussi une expression qui décrit la densité à vert en fonction de la pression [LIU 97].

Dans ce qui suit, on va analyser la nature des modifications de forme d'une particule de poudre considérée sphérique de rayon R_0. Ainsi, on considère les points suivants : (1) pendant la densification, la réduction de la distance entre deux particules sphériques voisines influence de la même manière les deux particules; (2) les surfaces de contact apparues à la suite de l'aplatissement de deux particules (étant initialement un seul point de contact) ont toujours une forme circulaire; (3) le nombre de coordination Z caractérisant le nombre de particules en contact ne change pas durant le processus de densification. Une fois ces conditions remplies, la particule de rayon R_0 évoluera vers un rayon plus grand R ayant des surfaces de contact communes avec les particules voisines, de forme circulaire de rayon r. La figure 1.7. [DAV 97] en est la représentation schématique.

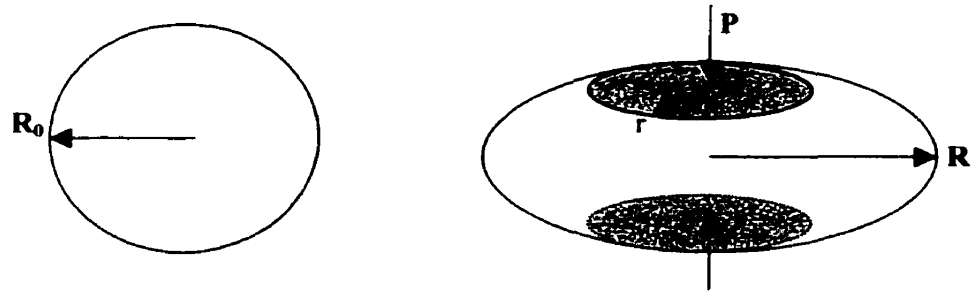


Figure 1.7. Schéma représentant la déformation d'une particule sphérique.

Le volume de la particule à l'état initial est:

$$V = \frac{4\pi R_0^3}{3} \qquad (2)$$

Le volume de la particule après la déformation peut être exprimé par la relation suivante:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 - Z\left[\frac{2}{3}\pi R^3 + \frac{1}{3}\pi\left(R^2 - r^2\right)^{\frac{3}{2}} - \pi R^2\left(R^2 - r^2\right)^{\frac{1}{2}}\right] \qquad (3)$$

Il est évident que le volume de la particule n'est pas modifié à la suite de la déformation. Après avoir égalisé les équations (2) et (3), et à la suite de quelques transformations mathématiques, on obtient la relation :

$$\left(\frac{R^2 - r^2}{R_0^2}\right)^{\frac{3}{2}} - Z\left[\frac{1}{2}\left(\frac{R^2 - r^2}{R_0^2}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{4} - \frac{3}{4}\frac{R^2}{R^2 - r^2}\right] - \left(\frac{R_0^2}{R^2 - r^2}\right)^{\frac{3}{2}} = 0 \qquad (4)$$

Dans cette situation, les auteurs [DAV 97] ont défini un facteur de forme qui caractérise la déformation de la particule. L'expression de celui-ci est la suivante :

$$\xi = \frac{r^2}{R^2 - r^2} \qquad (5)$$

En considérant que la densité du comprimé peut être décrite par la redistribution des volumes durant la densification, elle peut être écrite de cette manière : $DV = D_0V_0$, où D est la densité relative (la fraction de la densité théorique) du comprimé, V est le volume, D_0 est la densité apparente (initiale) de la poudre et V_0 est le volume qui correspond à cette densité.

Le volume du comprimé de poudre est déterminé par le degré d'aplatissement de l'ensemble des particules de poudre. C'est pourquoi suite au pressage on constate une augmentation de densité, la forme des particules évoluant d'une forme sphérique de rayon R_0 à une sphère aplatie, de dimension maximale R (figure 1.7.). Ainsi, la déformation fait que la distance entre le centre d'une particule et la plus proche particule voisine soit réduite de R_0 à $(R^2\text{-}r^2)^{1/2}$.

La densité relative D aura donc la forme :

$$D = D_0 \frac{V_0}{V} = D_0 \left(\frac{R_0^2}{R^2 - r^2} \right)^{\frac{3}{2}} \qquad (6)$$

En utilisant les expressions ci-dessus, les auteurs ont obtenu l'expression de la densité relative finale de la masse de poudre densifiée dans laquelle est intervenu aussi l'aplatissement des particules de poudre :

$$D = \frac{3}{4} Z D_0 (1+\xi) - \left(\frac{1}{2} Z - 1\right) D_0 (1+\xi)^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{4} Z D_0 \qquad (7)$$

Par conséquent, on peut trouver une équation qui mette en évidence l'influence de la pression qui provoque l'aplatissement des particules de poudre. Les auteurs ont considéré la pression qui contribue à la déformation des particules comme une résultante influencée par la limite d'écoulement σ_f du matériau, par les surfaces de contact circulaires (à rayon r) entre les particules et par l'angle θ de contact entre la direction de la force normale sur la surface de contact et la direction de la pression appliquée P (figure 1.8.).

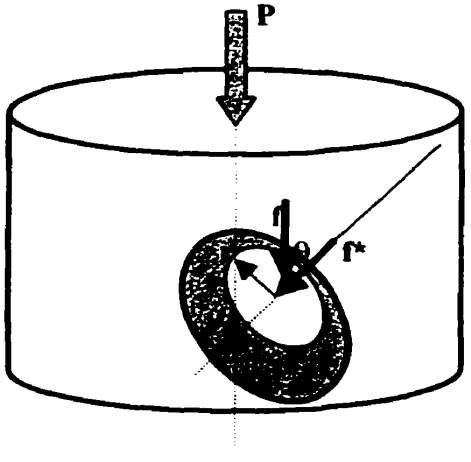


Figure 1.8. Schéma représentant la déformation d'une particule dans un ensemble comprimé sous l'action de la pression P.

La force normale sur la surface aplatie de rayon r d'une particule déformée est $\pi r^2 \sigma_f$ et sa composante sur la direction d'application de la pression P sera: $\pi r^2 \sigma_f \cos\theta$. En considérant Z le nombre de coordination, la force f parallèle à la direction d'application de la pression P exercée à la surface déformée de l'ensemble des particules est :

$$f = \sum_{1}^{Z/2} \pi r^2 \sigma_f \cos\theta = \pi r^2 \sigma_f \sum_{1}^{Z/2} \cos\theta = \pi r^2 \sigma_f \frac{Z}{2} \overline{\cos\theta} \qquad (8)$$

En conséquence que seulement une demie parmi les forces de contact entre les particules ont des composantes parallèles à la direction de pressage P, dans la formule (8) on a considéré Z/2. Aussi, $\overline{\cos\theta}$ représente la moyenne du $\cos\theta$ entre 0° et 90°, c'est pourquoi on a utilisé $\overline{\cos\theta} = 1/2$.

La force f est donc :

$$f = \frac{\pi}{4} Z r^2 \sigma_f \qquad (9)$$

En considérant une section transversale A dans le comprimé de poudre, la force F exercée sur celle-ci sera la somme des forces qui agissent sur chacune des particules qui

forment le volume élémentaire $2A(R^2-r^2)^{1/2}$. Si on considère également l'expression de la densité du nombre des particules $\frac{D}{\frac{4}{3}\pi R_0^3}$, on obtient l'expression de la force :

$$F = f\,2A\left(R^2 - r^2\right)^{1/2} \frac{D}{\frac{4}{3}\pi R_0^3} = \frac{\pi}{2} Z A \sigma_f r^2 \left(R^2 - r^2\right)^{\frac{1}{2}} \frac{D}{\frac{4}{3}\pi R_0^3} \qquad (10)$$

En introduisant dans l'équation (10) l'expression de D de la relation (7) on obtient finalement :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{3}{8} Z D_0 \sigma_f \frac{r^2}{R^2 - r^2} = \frac{3}{8} Z D_0 \sigma_f \xi \qquad (11)$$

Dans les conditions où Sheppard et McShane ont démontré [SHE 80] que la résistance à vert du comprimé σ_g est directement proportionnelle à la surface de contact entre les particules déformées et prenant en considération la relation (11) obtenue ci-dessus, on peut écrire :

$$\sigma_g = \frac{3}{8} Z D_0 k \xi \qquad (12)$$

où k est une constante de matériau qui dépend de la force des liaisons par unité de surface de contact entre deux particules déformées. Dans des conditions similaires de mesure, les valeurs de σ_g normalisée à k et de la pression P normalisée à σ_f sont égales :

$$\frac{\sigma_g}{k} = \frac{P}{\sigma_f} = s \qquad (13)$$

Le paramètre s obtenu [DAV 97] peut être utilisé dans l'analyse des changements qui sont intervenus au cours de la densification (la modification du nombre de coordination Z, de la densité du comprimé ou de la déformation des particules) ainsi qu'en tant que mesure de la résistance à vert du comprimé.

1.3. Distribution des contraintes et de la densité dans les comprimés à vert

L'une des plus importantes caractéristiques des matériaux obtenus par l'utilisation des techniques spécifiques à la métallurgie des poudres est la distribution de la densité dans le volume du comprimé à vert. Ceci n'est pas seulement une mesure de la qualité du processus de densification, mais elle détermine aussi le comportement du comprimé à vert durant le frittage ultérieur [HIR 69]. Généralement, la densité du comprimé à vert est influencée par certains éléments. La densité du comprimé à vert augmente sous l'influence de l'augmentation de la pression de densification qui entraîne le mouvement des particules, leur déformation et finalement leur rupture. De même, la densité du comprimé à vert s'accroît en même temps que la proportion de grosses particules. En effet, une augmentation de la densité apparente sera constatée lorsque le mouvement des particules ainsi que leur déformation ont été favorisés.

La déformation des particules est facilitée par la diminution de la dureté, de la limite d'écoulement de la particule et de la vitesse de pressage. Ces facteurs entraînent à leur tour l'augmentation de la densité du comprimé à vert. La dépendance générale de la

densité du comprimé à vert en fonction de quelques variables est présentée à la figure 1.9. [HIR 69]. Ainsi, la courbe A est valable pour des métaux mous (dureté H faible) et des particules de grandes dimensions, densifiées à faible vitesse de pressage (v^p). Au contraire, la courbe B caractérise les particules dures avec de petites dimensions comprimées à haute vitesse.

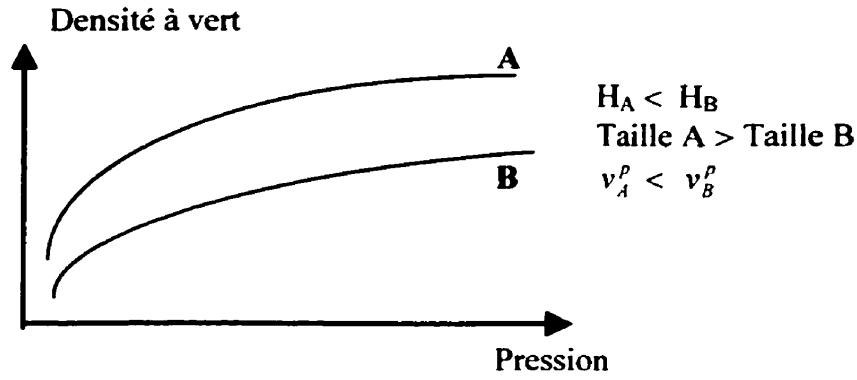


Figure 1.9. Dépendance générale de la densité du comprimé à vert au pressage [HIR 69].

Le gradient de densité à l'intérieur des pièces pressées résulte du frottement inévitable entre les particules et les parois de la matrice et de la friction entre les particules. Par conséquent dans les conditions du pressage uniaxe dans une matrice rigide, les particules seront assujetties à des pressions de densification différentes en fonction de leur emplacement dans le volume. Ainsi les particules seront soumises à des pressions de densification variables conformément à la relation suivante [GER 89] :

$$P = P_0 \exp\left(\frac{-4\mu z x}{D_c}\right) \qquad (14)$$

Dans la relation (14), P est la pression à la distance x par rapport au niveau supérieur d'application de la pression; P_0 est la pression appliquée; μ est le coefficient de frottement entre les particules de poudre et les parois de la matrice; D_c est le diamètre du comprimé; z est reliée directement aux interactions entre les particules et représente le rapport entre les contraintes radiale et axiale. z est une caractéristique pour le frottement principalement en début de pressage lors du réarrangement des particules.

L'équation (14) est applicable évidement dans le cas du pressage uniaxe dans une matrice rigide. Cette relation qui exprime en fait la diminution de la pression avec l'augmentation de la distance vers le bout du comprimé (jusqu'à la valeur maximale H) est représentée graphiquement à la figure 1.10. [TUR 98, GER 89].

À part la distribution axiale de la pression, dans le cas d'un comprimé cylindrique apparaît, comme on l'a déjà montré (figure 1.2.), une distribution radiale de forme parabolique [GER 89, SUR 84]. À cause des distributions radiale et axiale de la pression dans un comprimé cylindrique obtenu par le pressage dans une seule direction, on observera des différences de densité à la fin de pressage comme effet de la redistribution de la charge. Par exemple, la distribution de la pression dans un comprimé de cuivre pressé à 700 MPa est présentée à la figure 1.11. [GER 89, HAN 84, JON 60].

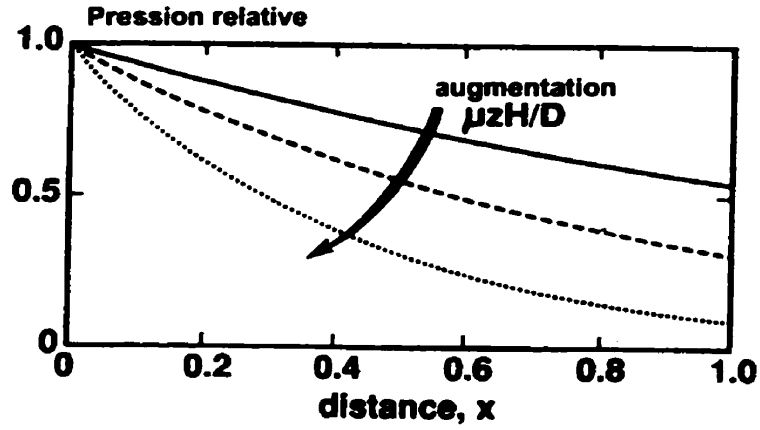


Figure 1.10. Variation de la pression relative P/P_0 en fonction des paramètres de densification $\frac{\mu z x}{D_c}$ [GER 89].

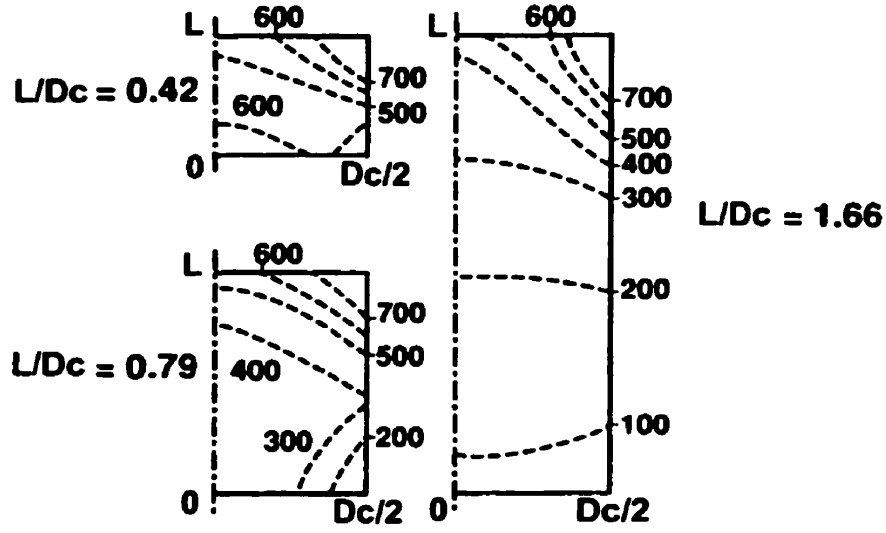


Figure 1.11. Iso - valeurs de pression (MPa) dans un comprimé de cuivre pressé à 700 MPa. L : longueur du comprimé, D_c : diamètre du comprimé [GER 89].

Comme on peut l'observer tout d'abord dans la relation (14) et ensuite dans la figure 1.11., on obtient d'autres iso-valeurs de pression typiques pour de différentes valeurs du rapport L / D_c et la distribution des densités concorde avec celle des pressions. Par exemple, on présente à la figure 1.12. [GAD 82, HAN 84, KUC 56] un comprimé (L / D = 0.87) obtenu par pressage uniaxe à 700 MPa, simple action, d'une poudre de Ni pur.

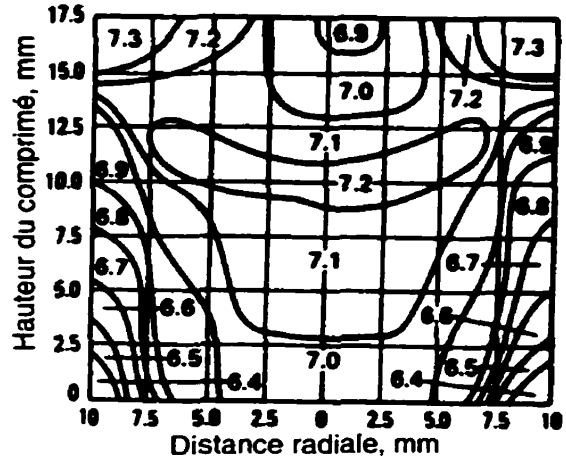


Figure 1.12. : Variation de densité dans un comprimé cylindrique de poudre de Ni pur [HAN 84].

On constate que la plus grande densité apparaît sur la surface supérieure (celle à partir de laquelle on applique la pression) dans les zones extérieures où le frottement avec les parois de la matrice provoque le déplacement relatif maximal entre les particules. La densité à la circonférence diminue rapidement en avançant vers le fond, là où la densité

est la plus faible. La distribution de la densité dans la zone de la ligne centrale (l'axe qui unit les milieux des bases du comprimé) où l'influence du frottement entre les parois de la matrice et la poudre est minimale est plus uniforme. Sur cet axe la densité se trouve à une valeur maximale à peu près à la moitié de la distance entre les surfaces supérieure et inférieure du comprimé.

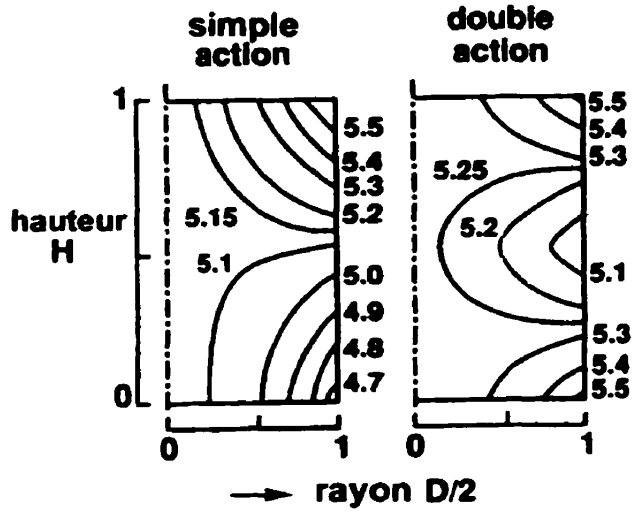


Figure 1.13. Iso - valeurs de densité dans un comprimé de poudre pour le pressage uniaxe simple action et double action [GER 89].

La situation sera tout autre dans le cas du pressage uniaxe à double action (supérieur et inférieur) dans une matrice rigide. Les différences dans la distribution de la densité sur la section du comprimé sont mises en évidence dans la figure 1.13. [GER 89].

Le frottement qui entraîne les phénomènes analysés ci-dessus est d'autant plus prononcé que la forme des particules est plus éloignée de la sphéricité et que leur surface présente plus d'aspérités. La réduction de l'effet produit par le frottement se réalise dans le cas de la densification dans des matrices métalliques rigides, par introduction des lubrifiants. Le rôle des lubrifiants est de former un "film" à l'interface entre la pièce comprimé et la surface de la matrice afin de limiter les contacts métal-métal lors de l'éjection de la pièce comprimé. Au moins deux effets sont visibles suite à l'utilisation des lubrifiants : 1) une distribution plus uniforme de la pression pendant le pressage de la poudre et 2) une extraction plus facile du comprimé à vert de la matrice en diminuant simultanément l'usure de la matrice de pressage.

Une seconde méthode de réduction de l'effet produit par le frottement des particules pendant la densification est le pressage isostatique. Celui-ci se réalise dans des sachets flexibles et procure l'avantage de l'élimination du frottement entre les parois de la matrice et la poudre.

1.4. Caractérisation des gradients de densité

Bien que pour les pièces à vert obtenues par métallurgie des poudres on désire aboutir à une densité uniforme, la pratique prouve que, dans les conditions où le pressage est réalisé dans des matrices métalliques rigides, il y a une distribution de densité dans le volume du comprimé. Une telle distribution de densité influence négativement aussi bien le stade suivant du processus (le frittage) que les propriétés mécaniques de la pièce finie. Ainsi, il est très intéressant de connaître la distribution de densité à vert du comprimé.

Comme on l'a déjà constaté dans les paragraphes antérieurs, la variation de densité dans le volume du comprimé obtenu par pressage uniaxe dans une matrice métallique rigide apparaît comme un effet du frottement entre les particules de poudre et les parois de la matrice [TUR 98, LAN 97, GER 89]. Dans de telles conditions, la pression appliquée a comme conséquence l'apparition d'un état de contrainte hétérogène qui influence le déplacement des particules ainsi que leur déformation [HAN 84, HIR 69, GET 94].

La détermination de la densité moyenne d'un comprimé poreux se réalise simplement par quelques mesures successives de leur masse dans différentes conditions [TUR 98, DIX 71]. Dans la première étape, le comprimé est pesé dans l'air (W_1) et ensuite il est imprégné d'huile. La viscosité de l'huile, le temps d'imprégnation et la température à laquelle on fait l'imprégnation sont standardisés. À l'étape suivante on pèse le comprimé imprégné d'huile dans l'air (W_2) et ensuite il est pesé dans l'eau pour obtenir W_3. La densité de la pièce est calculée avec la relation $\rho = \frac{W_1 \rho_{eau}}{(W_2 - W_3)}$.

Si la détermination de la densité moyenne d'un comprimé poreux présente l'avantage d'être réalisée sans difficulté, cette méthode ne fournit néanmoins aucune indication concernant la distribution de densité dans le volume du comprimé. Pour déterminer la densité locale dans un comprimé, la littérature propose des méthodes diverses qui ont comme finalité aussi bien la mise en évidence qualitative d'une distribution de densité dans le volume du comprimé, que la détermination quantitative de la valeur de celle-ci.

La démonstration de l'existence d'une distribution de densité et de pression à l'intérieur d'un comprimé [DAV 97, FIS 83, GOE 49, GER 89, GER 94, HAN 84, HIR 69, JON 60. LI 94, LIU 97, STR 86] a été mise en évidence initialement en introduisant dans une poudre de cuivre avant pressage des couches de poudre de graphite [LAN 97, GOE 49, JON 60]. La même idée a été reprise par Seeling et Wulff [SEE 46] qui ont pressé une

poudre de fer dans laquelle ils ont introduit des couches de poudre de cuivre. La déformation non uniforme de ces couches durant le pressage indique l'existence d'un frottement prononcé entre la poudre et les parois de la matrice, ainsi que l'influence du frottement dans l'apparition de la distribution de densité. En plus, dans le même ouvrage, les auteurs ont réalisé une évaluation du frottement en fonction du mode de lubrification (mélange avec la poudre ou lubrification des parois de la matrice) pour le pressage d'une poudre de Ni à 414 MPa (30 tsi). Les valeurs de densité du comprimé obtenues sont indiquées dans le tableau suivant (tableau 1.1) :

Tableau 1.1: L'effet des lubrifiants sur la densité à vert d'un comprimé de Ni pressé à 414 MPa (30 tsi) [SEE 46].

Type de poudre et mode de lubrification	Densité relative %
Poudre de Ni sans lubrifiant	66
Poudre de Ni + 0.5% graphite	76
Poudre de Ni + 4% graphite	78
Poudre de Ni + 4.5% fluorure de silicium	64
Poudre de Ni + 0.5% acide stéarique	75
Poudre de Ni; lubrification des parois de la matrice avec acide stéarique	76
Poudre de Ni; lubrification des parois de la matrice avec du graphite colloïdal	74

Une évaluation quantitative de la distribution de densité a été réalisée [KAM 49, GOE 49, HAN 84] par l'introduction à l'intérieur de la poudre avant le pressage d'une grille de plomb à ouvertures carrées (figure 1.14.).

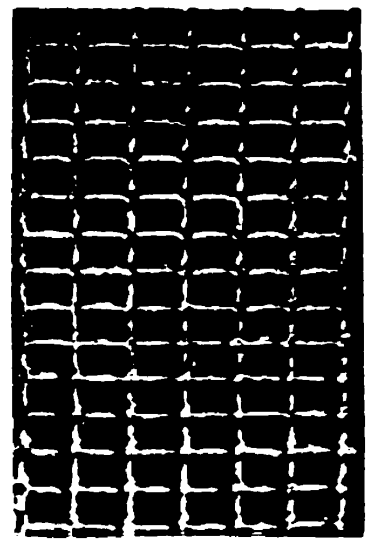


Figure 1.14. Radiographie d'une grille de plomb à ouvertures carrées équidistantes utilisée pour l'évaluation quantitative de la distribution de densité [GOE 49].

Ayant une limite d'élasticité très réduite, le plomb peut "suivre" facilement l'écoulement de la poudre pendant la densification. Ainsi, la densité peut être mise en évidence dans n'importe quel point du comprimé à l'aide de la mesure de la déformation de la grille

métallique. L'évaluation de cette déformation se réalise à l'aide des mesures dimensionnelles par exposition aux rayons X. L'utilisation du plomb pour la construction de la grille se justifie par le fait que celui-ci possède une grande capacité d'absorption des rayons X. Ainsi, l'observation de la grille déformée se fait par la différence d'absorption des rayons X entre le comprimé de poudre et la grille de plomb.

On peut effectuer une évaluation de la distribution de densité dans le volume du comprimé par une méthode similaire à celle exposée ci-dessus, en utilisant, à la place de la grille à ouvertures carrées, une grille à ouvertures circulaires [KAM 49, JON 60, HAN 84] (figure 1.15.).

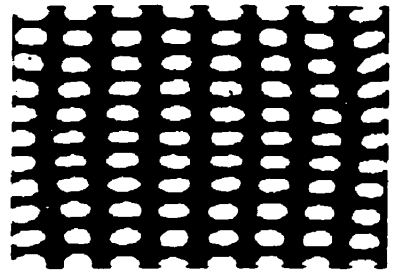


Figure 1.15. Radiographie d'une grille à ouvertures circulaires dans un comprimé de poudre pressé en mode double action à 155 MPa (22400 psi) [JON 60].

L'évaluation de la déformation de la grille est réalisée en faisant les mesures des dimensions des trous dans deux directions, une axiale et l'autre radiale, en prenant comme référence la direction d'application de la pression.

Une autre méthode de détermination de la distribution de densité dans un comprimé est basée sur des mesures de dureté. Cette méthode est décrite dans plusieurs articles [GOE 49, JON 60, HIR 69, HAN 84, LAN 97] et utilise la corrélation entre l'augmentation de la dureté et l'écrouissage qui résulte de la déformation plastique des particules individuelles de poudre. Ce comportement est illustré dans la figure 1.16.

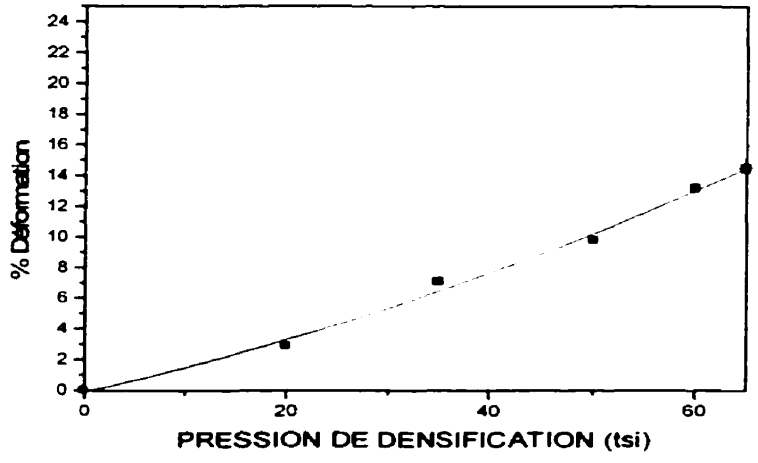


Figure 1.16. Dépendance de la déformation plastique des particules individuelles en fonction de la pression de densification (tsi) pour une poudre atomisée de fer [HIR 69].

Ainsi, pour les expériences de pressage décrites dans [GOE 49], des poudres de cuivre électrolytique et de fer poreux ont été utilisées pour réaliser des comprimés cylindriques de diamètres de 22,2 mm et de 73 mm. Ces comprimés ont été tranchés selon des directions parallèle et perpendiculaire par rapport à la direction d'application de la pression de façon à obtenir à la fin des cubes d'arêtes de 9,5 mm. Le poids et le volume de chacun des cubes ont été déterminés pour calculer les densités. De plus, on a déterminé la dureté Brinell à la surface des cubes. Avec l'ensemble des résultats obtenus on a pu réaliser une grille représentant la distribution de la dureté et de la densité en différents points le long du rayon du comprimé et la variation de dureté sur la section parallèle à l'axe d'application de la pression qui passe par le centre du comprimé.

Le principe du sectionnement du comprimé et de la détermination de la dureté des particules a été utilisé aussi par G. C. Kuczynski et I. Zaplatynskyj [KUC 56, HAN 84] pour la détermination de la distribution de densité dans un comprimé de Ni (figure 1.12.).

En utilisant le diagramme de la figure 1.17. pour la correspondance entre la dureté Rockwell d'une poudre d'acier alliée (Fe - 0,22% C - 0,21% Mn - 0,012% S - 1,96% Ni - 0.43% Mo - 0,18% O) et les valeurs de densité relative, K.T. Kim et Y.H. Cho [KIM 93] ont réalisé des mesures de dureté sur la section d'un échantillon. L'échantillon fait

partie d'une série obtenue par pressage isostatique à froid (à des pressions qui varient entre 3 t / cm^2 (300 MPa) et 4 t / cm^2 (400 MPa). Ensuite, les échantillons ont été frittés à différentes températures et déformés. Les iso-valeurs de densité obtenues par détermination de dureté et par analyse d'image sur une section transversale sont présentées sur la figure 1.18.

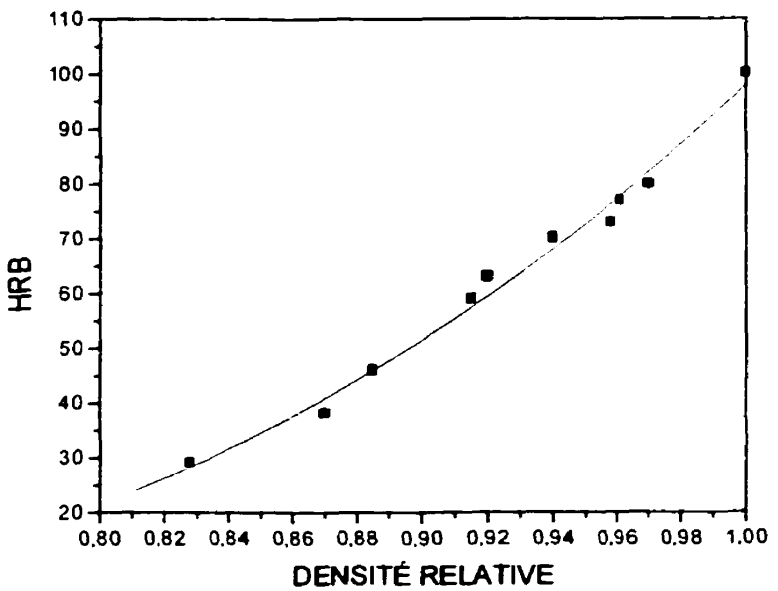


Figure 1.17. Variation de la dureté Rockwell (HRB) avec la densité relative pour une poudre d'acier alliée poreuse (type HF4, Mannesmann) [KIM 93].

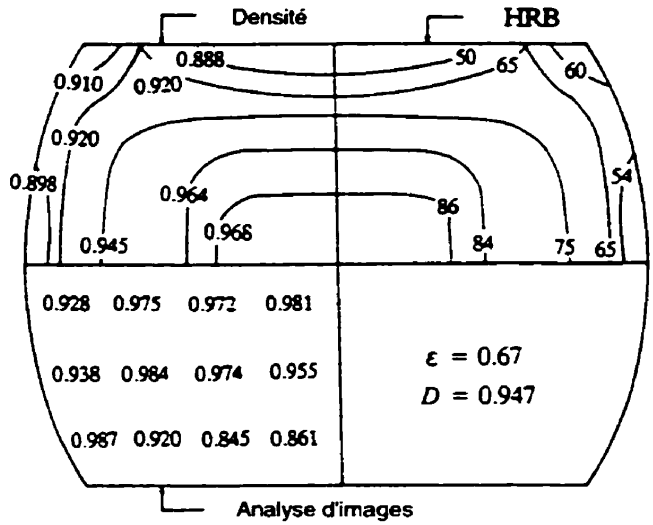


Figure 1.18. Iso-valeurs de densité obtenues par la détermination de dureté et par analyse d'image sur une section transversale d'un échantillon pressé isostatique à froid à 3 t / cm^2 (300 MPa), fritté et déformé à $\varepsilon = 0.67$ [KIM 93].

Des études plus récentes [LAN 97, GAR 95, YAM 89] se sont intéressées à la distribution de densité dans les comprimés à vert en utilisant d'autres techniques qui, schématiquement, peuvent être partagées en méthodes optiques et méthodes acoustiques. Chacune de ces deux classes présente des avantages et des désavantages si elles sont analysées du point de vue du rapport performance / prix. Lorsqu'on se rapporte à la performance, les éléments dont on tient compte sont surtout la sensibilité dans la détermination de la distribution de densité, la vitesse et la facilité de mesure, la nécessité de préparation de l'échantillon à analyser, la facilité d'interprétation des résultats, etc.

L'une des méthodes les plus exactes de mesure de la distribution de densité dans le volume d'un comprimé de poudre métallique est la mesure de la vitesse des ultrasons [LAN 97, GAR 95]. Cette méthode présente l'avantage de caractériser l'échantillon par un moyen non destructif. Elle repose sur le principe que la vitesse d'un signal ultrasonore augmente en traversant un milieu plus dense. La relation entre la vitesse ultrasonore et les caractéristiques de matériau est donnée par : $V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$ où ν est le coefficient de Poisson peu influencé par la densité ρ du matériau et E est le module de Young du matériau. Généralement le module de Young est fortement influencé par la densité relative du matériau. C'est pourquoi la vitesse des ultrasons dans un comprimé augmente avec la diminution des porosités.

La première étape consiste à mesurer les vitesses ultrasonores sur plusieurs échantillons du même matériau que celui à analyser, ayant des formes régulières et différentes densités uniformes connues. On réalise ainsi une grille montrant la correspondance entre les densités uniformes connues et les valeurs mesurées de la vitesse ultrasonore.

La caractérisation du comprimé de forme cylindrique ou de parallélépipède représente la deuxième étape et elle est réalisée par balayage ultrasonore de toute la section centrale du comprimé, parallèle à la direction d'application de la pression. La corrélation des

valeurs des vitesses ultrasonores obtenues avec la grille peut donner une image de la distribution de densité dans le volume du comprimé.

En principe, le fonctionnement de l'appareil est le suivant (figure 1.19.) : une source piézo-électrique émet à la surface de l'échantillon un signal ultrasonore (de quelques MHz). Après avoir traversé l'échantillon une seule fois ou, par réflexion, plusieurs fois, le signal ultrasonore est capté en enregistrant le temps de parcours à travers l'épaisseur de l'échantillon. Par la corrélation de ces deux valeurs (le temps de parcours mesuré et l'épaisseur de l'échantillon connue), on peut déterminer la vitesse du signal ultrasonore qui caractérise l'échantillon poreux.

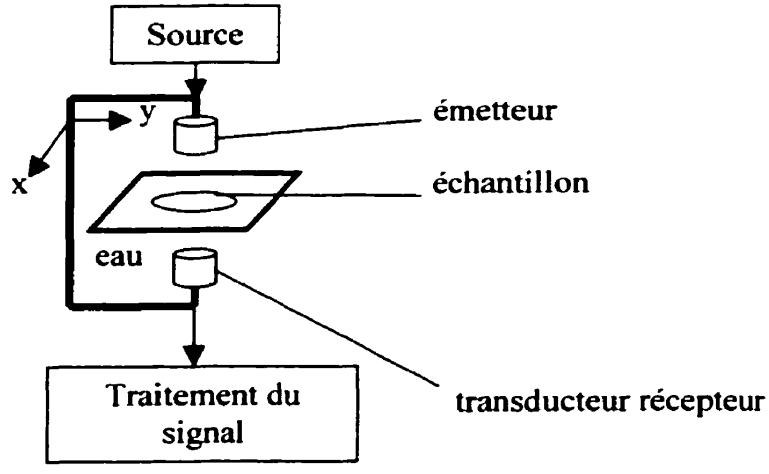


Figure 1.19. Schéma de principe pour la mesure du distribution de densité d'un comprimé de poudre métallique par la mesure de la vitesse des ultrasons.

Il y a cependant une particularité dans l'utilisation de la méthode de la détermination de la vitesse ultrasonore dans les comprimés poreux. Cette particularité consiste dans le fait que, pour pouvoir réaliser les mesures, l'échantillon est introduit dans un fluide ayant un rôle d'agent de couplage entre l'appareil de mesure (le générateur d'un signal ultrasonique et le détecteur) et l'échantillon poreux. La condition dont il faut tenir compte est que le liquide utilisé n'affecte pas l'intégrité de l'échantillon. Le liquide utilisé est habituellement l'eau ou l'éthanol.

Il faut admettre que l'utilisation d'un liquide de couplage pour les mesures de distribution de densité représente un compromis entre l'utilisation des ultrasons sur des comprimés poreux et le désavantage de modification du comportement du comprimé face aux ultrasons. Aussi, l'information obtenue intègre la variation de densité au travers de l'échantillon, c'est pour cela qu'il est plus difficile de déterminer la distribution de densité dans les pièces de gros volume.

Cependant, on a publié des articles dans lesquels on a utilisé une couche de gel de silicone [GAR 95, WRI 95], un élastomère spécial [GAR 95, JON 86], une membrane sous vide [GAR 95, ROB 88] (figure 1.20.) ou une bande adhésive [GAR 95, YAM 89] (figure 1.21.).

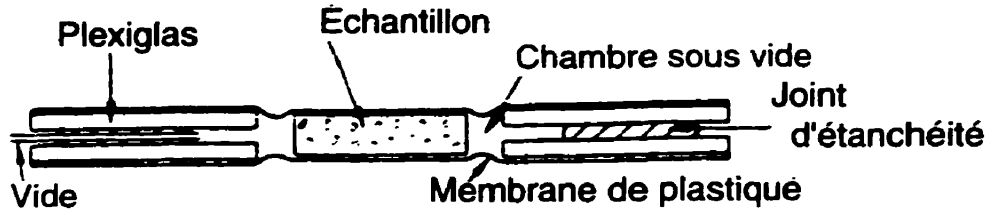


Figure 1.20. Section schématique dans le montage pour réaliser des mesures ultrasoniques en utilisant comme agent de couplage une membrane de plastique sous vide.

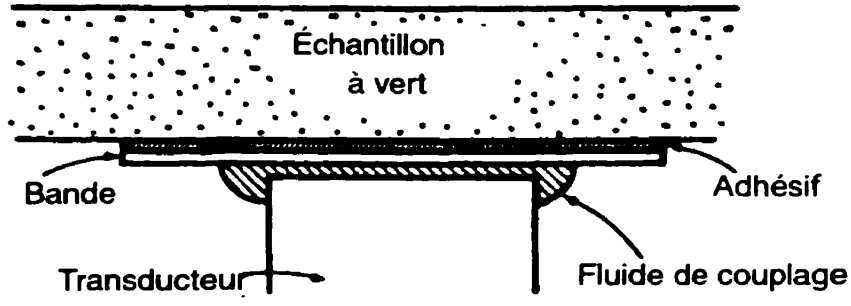


Figure 1.21. Schéma de montage pour réaliser des mesures ultrasoniques en utilisant comme agent de couplage une bande adhésive.

La méthode ultrasonique classique présentée ci-dessus peut avoir également la variante "laser" [GAR 95], dans laquelle aussi bien l'émission du signal que sa détection sont réalisées de manière optique. Tout comme dans l'exemple antérieur, cette méthode garde l'intégrité de l'échantillon. Une impulsion laser orientée vers l'échantillon produit des déformations locales générant des oscillations élastiques qui représentent le signal à analyser.

Ces oscillations se propagent dans toutes les directions (longitudinale, transversale et en surface) diminuant le signal qui nous intéresse. Pour éviter ce phénomène, on utilise deux sources laser, la détection se réalisant par interférométrie optique. Les valeurs des vitesses ultrasonores obtenues suite à l'utilisation de cette méthode sur des échantillons céramiques pressées à 68,9 MPa, sont montrées à la figure 1.22.

Les mesures ont été effectuées à des intervalles de 5 mm le long des arêtes de l'échantillon. On constate que la variation de la vitesse mesurée est importante le long des arêtes entre les positions inférieure et supérieure de l'échantillon, et elle est relativement faible dans la zone médiane de l'échantillon.

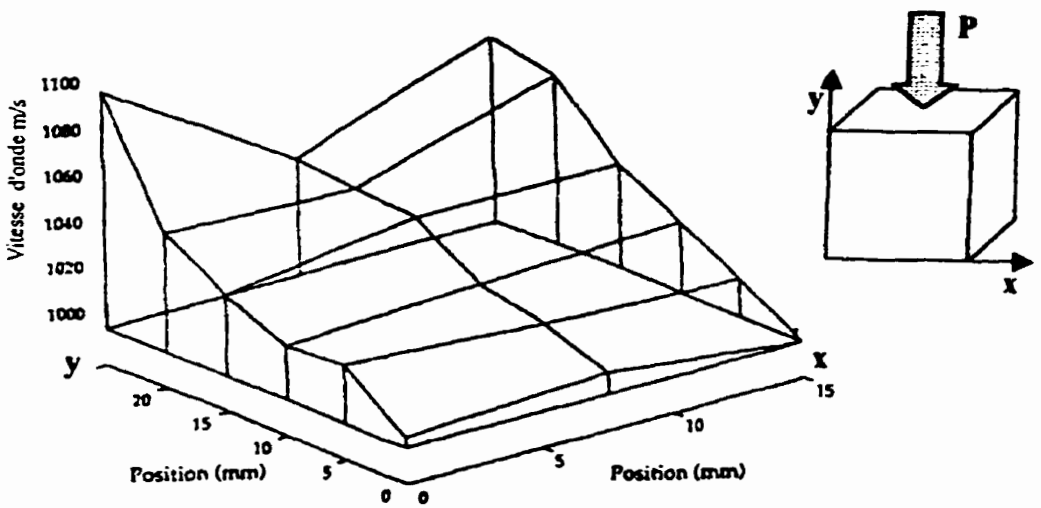
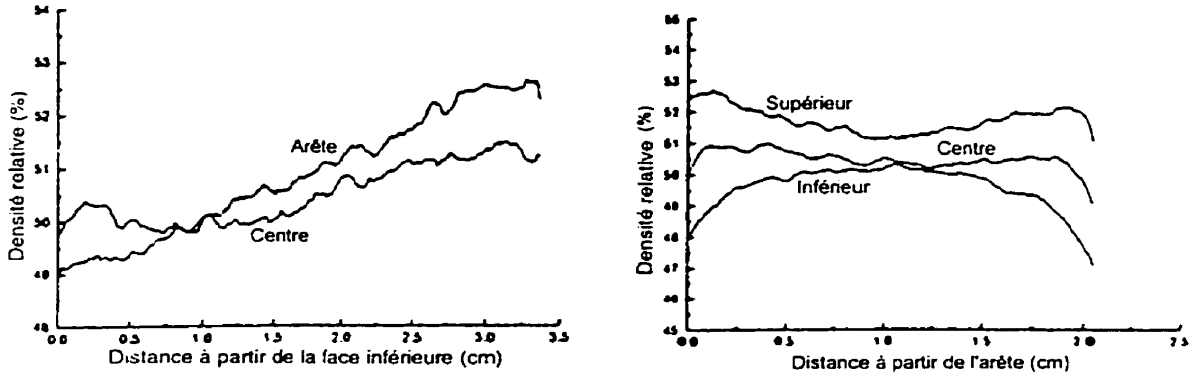


Figure 1.22. Variation de la vitesse d'onde (dans différents endroits) dans un échantillon d'alumine pressé à 68,9 MPa [GAR 95].

Bien que relativement complexe comme méthode (qui implique des coûts importants), le principal avantage de l'utilisation des systèmes optiques à la place des détecteurs ultrasonores conventionnels est la possibilité de l'exécution des mesures sans contact, même si l'échantillon se trouve dans des milieux hostiles.

Une autre méthode utilisée pour la caractérisation des variations de densité dans les comprimés pressés de poudres est celle des radiographies à rayons X [GAR 95].

L'avantage essentiel de la méthode est que l'analyse peut être faite rapidement, sans détruire l'échantillon et sans une préparation préalable de celui-ci. Ainsi, en utilisant la radiographie à rayons X pour un échantillon pressé (simple action) à 68,9 MPa, on confirme que la densité augmente dans la direction de pressage, ayant la valeur minimale au niveau inférieur de l'échantillon (figure 1.23.a.). On peut déterminer aussi la variation de densité sur une direction perpendiculaire à celle d'application de la pression, (figure 1.23.b.) à différents niveaux de l'échantillon.



a) b)

Figure 1.23. Variation de densité dans des directions axiale et transversale dans un échantillon pressé simple action à 68,9 MPa (résultats obtenus par radiographie à rayons X) [GAR 95].

En principe, la méthode est basée sur l'atténuation de l'intensité d'une radiation X en traversant un échantillon (à densité variable, avec des impuretés, etc.). Après l'exposition, sur le côté opposé de l'échantillon la radiation est captée sur un écran ou sur une pellicule photosensible, obtenant ainsi une image en niveaux de gris. Ces nuances de gris caractérisent la distribution de densité (ou des impuretés) du comprimé. Pour chaque type et épaisseur d'échantillon, on contrôlera le contraste de l'image pour un choix de l'énergie de radiation X. Les valeurs de densité qui correspondent à chaque niveau de gris, tout comme dans le cas de la méthode ultrasonore, s'identifient par la réalisation d'une grille de niveaux (à la même valeur de l'énergie de radiation X) sur des standards avec des densités connues.

Bien que très intéressante, la méthode des radiographies à rayons X n'a pas la précision de celle avec ultrasons, par exemple. L'explication se retrouve dans la diminution de la résolution de l'image obtenue par les "zones fausses" causées par la radiation X secondaire à basse énergie. Le recouvrement de l'échantillon avec une feuille métallique peut assurer la protection contre ces radiations.

Une variante de la méthode des rayons X utilisée surtout pour les matériaux céramiques est l'autoradiographie [GAR 95]. La différence par rapport à la méthode antérieure dans laquelle le matériau photosensible était bombardé d'une radiation X, est que l'échantillon dont on cherche la distribution de densité, est lui-même radioactif ou, tout au moins, les particules qui ont été "étiquetées" avec des isotopes radioactifs. Dans l'autoradiographie,

l'échantillon est placé sur une plaque photosensible où il est laissé assez longtemps. Après l'impression de la plaque, on obtient tout comme dans le cas précédent, une image avec la distribution de densité en nuances de gris. Les niveaux de gris peuvent être déterminés en les comparant avec la grille de calibrage réalisée sur des échantillons avec des densités connues, tout comme dans le cas précédent.

Quoique limitée par les inconvénients générés par le travail avec des substances radioactives, cette méthode a été décrite et utilisée [GAR 95, MAC 77] pour la caractérisation de la distribution de densité dans des comprimés de dioxyde d'uranium. La figure 1.24. montre les distributions de densité dans quelques comprimés avec différentes valeurs pour le rapport H / D.

L'application de l'analyse informatique pour visualiser le plus fidèlement possible la variation de densité dans le volume d'un comprimé, est réalisée par la tomographie avec des rayons X ou γ [GAR 95, LAN 97]. En principe, la méthode repose sur l'absorption des rayons X (ou γ) à l'intérieur de l'échantillon. La particularité de cette méthode consiste dans le fait qu'après l'obtention d'une première image, l'échantillon (ou la source) est tourné d'un angle inférieur à 180° et on enregistre une seconde image. De l'analyse des informations à la suite des deux "lectures", l'ordinateur reconstruit une image qui représente le niveau de diminution de la radiation dans chaque point du volume de l'échantillon, en attribuant à chacun un niveau adéquat de gris. L'image dans des nuances de gris est traitée de la même manière que dans les méthodes déjà vues. La

figure 1.25. présente la distribution de densité dans un comprimé à vert de poudre d'oxyde de zinc, ainsi que dans le comprimé fritté. Même après le frittage, dans le volume du comprimé, une distribution de densité est facilement visible.

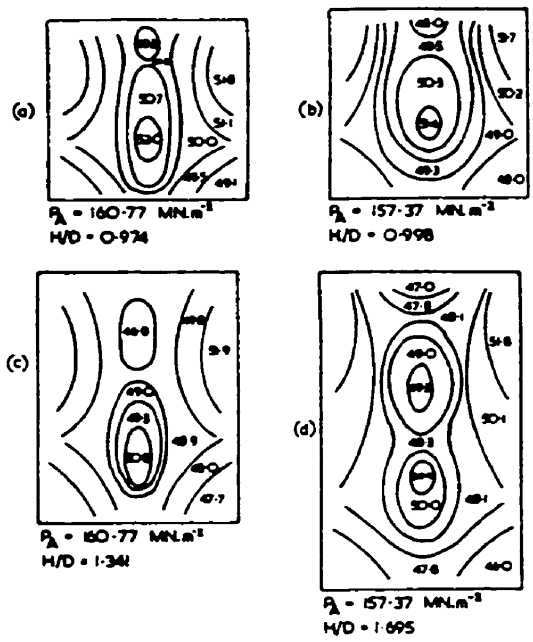


Figure 1.24. Distribution de densité relative dans des comprimés de poudre de dioxyde d'uranium non – lubrifié dont le rapport H / D a été modifié [GAR 95].

Sans tenir compte du prix élevé d'une installation de tomographie et de l'apparition possible des artefacts, l'utilisation des radiations γ [GAR 95] dans cette méthode présente l'avantage de la détermination directe et précise des valeurs absolues de densité,

sans la nécessité du calibrage. Cette caractéristique est assuré par l'utilisation des coefficients d'atténuation du matériau pour une longueur d'onde bien définie. Ainsi on peut réaliser des images de distribution de densité pour n'importe quel plan de l'échantillon. De plus, l'énergie de la radiation γ étant élevée, on peut utiliser des échantillons avec des épaisseurs supérieures à celles des tests avec radiation X.

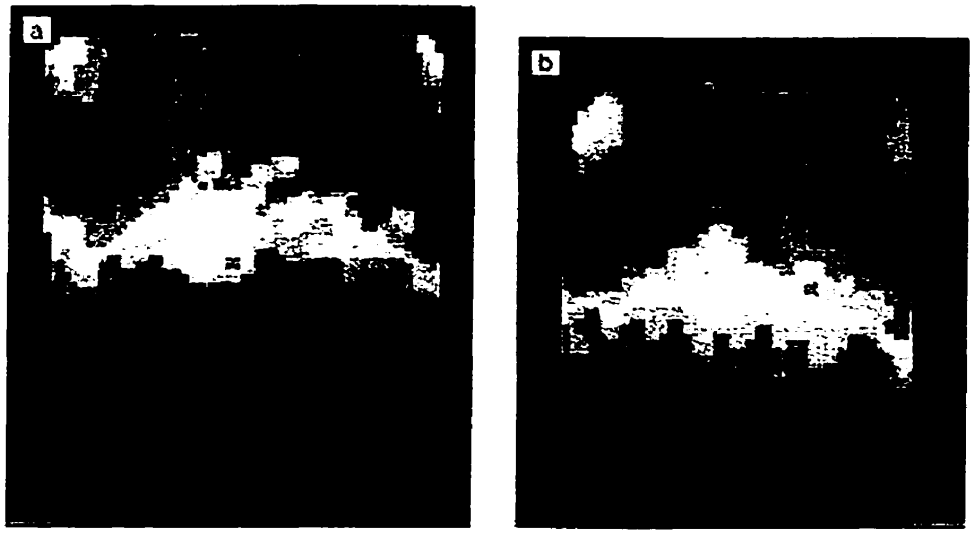


Figure 1.25. Images d'un comprimé de poudre d'oxyde de zinc obtenues par tomographie avec des rayons X. a) comprimé à vert pressé à 6,0 MPa; b) comprimé fritté 60 min à 1000 °C [GAR 95].

L'apparition possible des artefacts due à la forme irrégulière des pièces constitue un désavantage et une limitation dans l'utilisation de cette méthode. Ainsi, l'artefact donné par le changement abrupte dans l'atténuation des rayons X aux arêtes de l'échantillon dû

au passage des rayons du milieu dense (échantillon) en milieu ambiant (air), peut être éliminé par l'introduction de l'échantillon dans un liquide. Les artefacts n'apparaissent pas dans les échantillons à vert de forme régulière (cylindrique) dont la densité diminue des arêtes vers le centre [GAR 95].

Une méthode directe d'étude des comprimés qui présentent une hétérogénéité physique est l'analyse d'images [TUR 98, LAN 97, GAR 95, AKP 92, RUS 90, PET 86]. Le comprimé étudié est tranché dans différentes directions d'intérêt (par exemple, le long de plans longitudinaux et transversaux ayant comme référence la direction d'application de la pression de densification). Les surfaces de coupe sont ensuite préparées d'après les méthodes générales métallographiques. L'image en deux dimensions obtenue au microscope métallographique présente certaines sections des particules pressées. À cause de l'orientation aléatoire des particules tranchées, l'image présente des surfaces qui varient d'une valeur minimale jusqu'au plus grand diamètre de la particule. Ainsi, on peut tirer certaines informations valables en regard de la forme des particules mais on ne peut rien affirmer sur leurs dimensions (figure 1.26.).

Ayant comme base d'analyse les images en 2-D, il existe la possibilité d'estimer la taille des particules considérées comme population, par modélisation mathématique. En partant d'une forme générale, par modélisation, on peut déterminer les valeurs qui peuvent être mesurées sur l'image. Par corrélation entre les valeurs estimées et celles mesurées, on trouve les dimensions des particules.

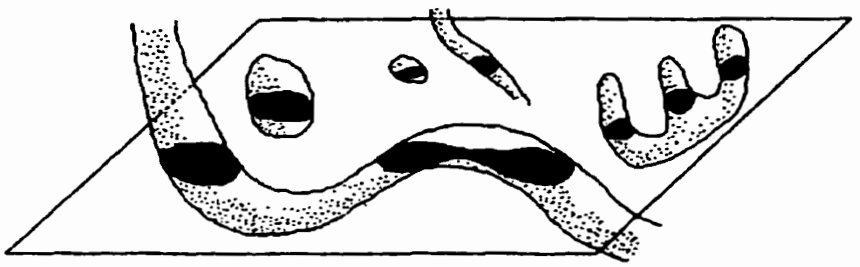


Figure 1.26. Exemple d'image obtenue par section dans un échantillon [RUS 90].

Une autre possibilité pour obtenir des informations en 3-D en faisant des observations en 2-D est de réaliser des séries de tranches. Chacune de ces tranches sera analysée séparément. L'assemblage final des résultats successifs en 2-D permet d'obtenir l'image de la structure en 3-D (figure 1.27.).

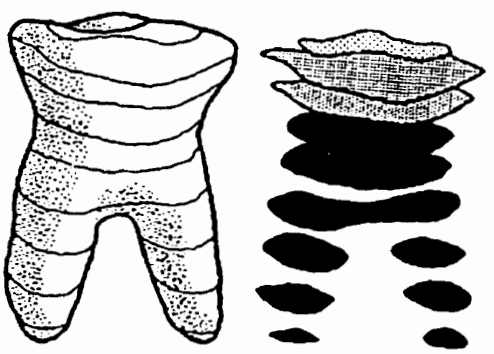


Figure 1.27. Réalisation d'une image en 3-D utilisant les images en 2-D obtenues par une série de tranches [RUS 90].

Quoique attrayante, cette méthode est pratiquement inapplicable aux comprimées à vert des poudres métalliques. Comme on peut s'imaginer, selon le principe présenté sur la figure 1.28., entre deux surfaces de coupe peuvent exister des modifications importantes de la structure. Pour minimiser les erreurs d'interprétation, les plans de coupe doivent être nombreux sur des intervalles étroits. Cette condition introduit la limitation d'applicabilité de cette méthode à cause de la difficulté de préparer des tranches minces de comprimés à vert de poudres métalliques par des méthodes métallographiques en gardant toujours leurs intégrité.

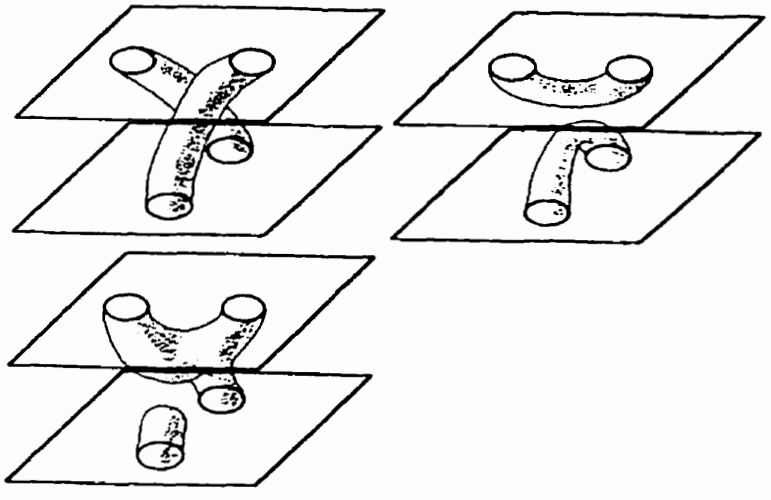


Figure 1.28. Modification de la structure entre deux plans de coupe qui fournit des ambiguïtés dans l'interprétation en 3-D [RUS 90].

La méthode suppose que les images soient prises sous forme discrète (numériques) et converties dans des images binaires. Dans les comprimés de poudres, les particules apparaîtront en couleurs claires (blanc) tandis que la porosité sera représentée par des nuances de gris allant jusqu'au noir, conformément au degré de contraste adopté. La distribution de densité dans le volume du comprimé sera obtenue par l'analyse de l'image de la tranche du comprimé étudié.

Outre la distribution de densité, par l'analyse d'images on peut obtenir des détails (dans certaines limites) concernant la forme des particules ainsi que les dimensions et la distribution des particules et des porosités dans un comprimé. En plus, par l'analyse d'image, on peut obtenir des informations statistiques en ce qui concerne le nombre des particules par l'unité de surface, le nombre de contacts entre les particules, le pourcentage de la surface occupé par des particules, etc.

Attrayante pour une étude de laboratoire, l'analyse d'images présente aussi des désavantages qu'on ne peut pas négliger. Parmi eux, il faut mentionner la difficulté de réaliser des interprétations en trois dimensions suivant les observations bi-dimensionnelles et le travail long et soigné nécessaire à la préparation de chaque échantillon à analyser [LAN 97, GAR 95, AKP 92, RUS 90].

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE ET ÉLABORATION DES HYPOTHÈSES

2.1 Méthodologie

Tout comme on l'a constaté dans le premier chapitre, la métallurgie des poudres permet la fabrication de pièces ayant une forme complexe par pressage en différentes conditions. Prenons par exemple un comprimé obtenu par pressage dans une matrice métallique rigide. On y observe aisément, aussi bien au microscope qu'à un simple regard superficiel une déformation considérable des particules dans certaines zones du comprimé ; cette variation de déformation des particules sera reliée à l'apparition d'un gradient de densité dans le volume de la pièce comprimée. Cette variation de densité sera difficile à récupérer lors de l'application du traitement ultérieur de frittage, phénomène qui a comme effet l'apparition des zones avec des propriétés mécaniques variables et affaiblies de la pièce finie. Ces effets sont rarement acceptés dans le cas des pièces finies réalisées à partir de poudres métalliques.

Il est évident que l'élimination de ces inconvénients pourrait être réalisée par l'élimination de la distribution de densité du comprimé à vert. La distribution de densité est pourtant un effet du frottement pendant le pressage, plus précisément, le frottement réciproque entre les particules de poudre et le frottement de celles-ci sur les parois de la matrice, entraînant un état de contrainte irrégulier qui influence aussi bien le déplacement des particules que leur déformation.

Ainsi, de nombreuses recherches actuelles de la métallurgie des poudres s'occupent de l'étude de la densification des poudres métalliques afin de trouver des solutions pour l'uniformisation de la densité dans le volume de la poudre pressée et pour la maximisation de la densité des comprimés à vert.

Dans le même but, une analyse sur la densification de trois classes dimensionnelles d'une poudre de fer obtenue par atomisation à l'eau sera réalisée dans la présente étude. La densification sera effectuée par pressage simple action en présence et en l'absence de lubrifiants. L'effet de l'application de la pression sur les particules de poudre sera mis en évidence par l'analyse d'images.

Les comprimés ayant la forme d'un parallélépipède seront sectionnés dans la zone médiane d'après un plan parallèle à la direction d'application de la pression et la surface de coupe sera préparée suivant des méthodes métallographiques conventionnelles. Dans des zones précises, on établira des micro-surfaces considérées comme faisant partie des

micro-volumes à densité homogène. Ces zones seront photographiées et analysées à l'aide d'un programme d'analyse d'images. Pour chaque surface considérée on déterminera par l'analyse d'images un "facteur de forme" spécifique, représentant la moyenne arithmétique des facteurs de forme de chaque particule de la surface étudiée. Par l'entremise de ce facteur de forme moyen on peut faire une évaluation de la déformation de la poudre à la suite de l'application de la pression.

Dans cette étude on se propose aussi de vérifier l'hypothèse de l'existence d'une tendance dans la déformation des particules de poudre dans diverses zones du volume du comprimé. En vue de cette évaluation, on peut considérer le volume du comprimé de poudre comme un ensemble de micro-volumes à densité uniforme, à chacun correspondant une déformation spécifique des particules qui le composent. En mesurant statistiquement la déformation des particules dans chacun de ces micro-volumes, on finit par obtenir une évaluation de la distribution de densité dans tout le volume du comprimé de poudre, en fonction de la déformation des particules.

On va étudier trois classes de taille d'une poudre de fer de type Atomet 1001 : +106 μm / -150 μm, + 45 μm / -75 μm et un mélange de ces deux classes ayant été réalisé d'après le modèle d'empaquetage bi-modal [GER 94] en vue d'obtenir une densité maximale. En utilisant une matrice métallique rigide à pressage uniaxe et une presse hydraulique à simple action, on a envisagé d'obtenir des comprimés pour chacune des classes de poudre, à quatre pressions différentes : 275 MPa (20 tsi), 414 MPa (30 tsi), 621 MPa (45

tsi) et 965 MPa (70 tsi). Afin de mettre en évidence l'effet du lubrifiant ainsi que l'efficacité de la lubrification, on va réaliser des comprimés de poudre non-lubrifiée (les parois de la matrice ayant été couvertes d'une fine couche de graphite pour rendre plus facile l'éjection du comprimé) et des échantillons pressés d'un mélange de poudre métallique avec 1% (massique) de stéarate de zinc.

2.2. Facteur de forme

En envisageant les conditions spécifiques de l'analyse d'images exposées dans le premier chapitre, on estimera la déformation des particules en fonction de la forme initiale des particules utilisées pour le pressage. La plus simple relation qui puisse caractériser une particule est le rapport entre deux dimensions de la particule, dimensions mesurées sur deux directions différentes. C'est ce qu'on appelle le "facteur de forme". Il est très important d'établir les directions selon lesquelles on doit faire les mesures pour la détermination du facteur de forme.

Supposons tout d'abord que la poudre qui subit le processus de pressage est formée d'un ensemble de particules parfaitement sphériques. En sectionnant une particule avec un plan et en mesurant deux dimensions de celle-ci en quelque direction que ce soit, on obtiendra constamment la valeur unitaire du facteur de forme. À la suite de l'application

d'une pression verticale sur la particule sphérique, celle-ci change de forme et devient semblable à un ellipsoïde. Toute section réalisée à travers la particule déformée d'après la direction de l'application de la pression sera elliptique. Par conséquent, une évaluation de la déformation de cette particule doit être faite par les mesures des dimensions sur la direction parallèle et perpendiculaire à celle d'après laquelle a été appliquée la pression. Le fait que l'action de la pression se manifeste du haut en bas justifie la facilité avec laquelle on peut apprécier le degré de déformation des sphères rien qu'en déterminant un facteur de forme (supérieur à 1) d'après les directions horizontale et verticale. En réalité, cependant, la forme des particules avant pressage est irrégulière mais pour l'étude on peut admettre que leur forme est plutôt ellipsoïdale que sphérique (figure 2.1).

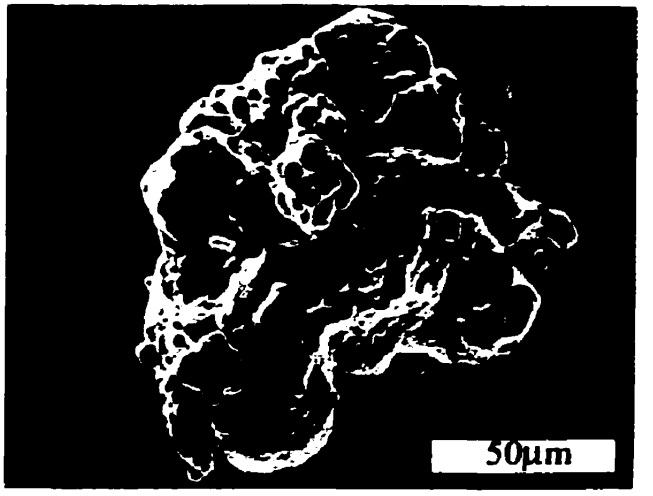


Figure 2.1: Particule de poudre de fer atomisée [LEN 80].

Cet élément engendre des difficultés supplémentaires pour apprécier la déformation des particules. Tout d'abord, même si l'on sait d'avance qu'il y aura une certaine tendance dans l'arrangement des particules de poudre au moment de l'écoulement libre dans la matrice, à la suite de l'application de la pression il nous est impossible de déterminer l'angle de désorientation de chaque particule par rapport à la direction de l'application de la pression. De même, il nous est impossible de déterminer l'angle de désorientation des particules déformées par rapport au plan de section de l'échantillon pour l'analyse d'images.

Dans la situation idéale, où la direction de pressage du comprimé correspondra à l'un des axes de rotation de l'ellipsoïde, la coupe à travers l'échantillon parallèle à l'axe de pressage sera représentée par une image elliptique de la particule sectionnée. En mesurant les dimensions de celle-ci sur la direction de l'axe de pressage et perpendiculairement sur celui-ci, on obtient un facteur de forme qui caractérise la déformation de la particule d'après les deux directions.

On pourrait envisager de même le cas où le plan de coupe de la particule étudiée ne coïncide avec aucun des axes de symétrie de rotation de l'ellipsoïde.

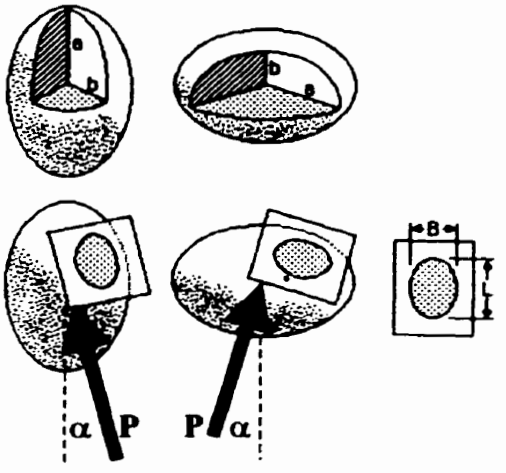


Figure 2.2 Plan de section aléatoire dans une particule de forme ellipsoïdale [RUS 90].

La coupe obtenue aura elle aussi une tendance vers la forme elliptique (figure 2.2.), mais elle ne représentera pas la déformation de la particule d'après la direction axiale et radiale, mais uniquement une projection de celle-ci, les dimensions de la projection étant en fonction de l'angle de désorientation (α, $\alpha < 90^{\circ}$) entre les particules. Pour $\alpha = 0^{\circ}$ on se retrouve dans la situation idéale qu'on a présenté plus haut.

Étant donné tout cela, le facteur de forme peut être apprécié comme le rapport entre l'axe de la plus longue dimension et la perpendiculaire la plus courte sur cet axe à travers la particule déformée (figure 2.3.). Une évaluation correcte de la déformation des particules peut être obtenue uniquement par une interprétation statistique des facteurs de

forme mesurés sur un nombre important de particules étudiées, aussi bien avant le pressage que dans la zone d'intérêt de la section réalisée à travers le comprimé.

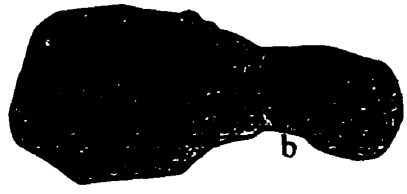


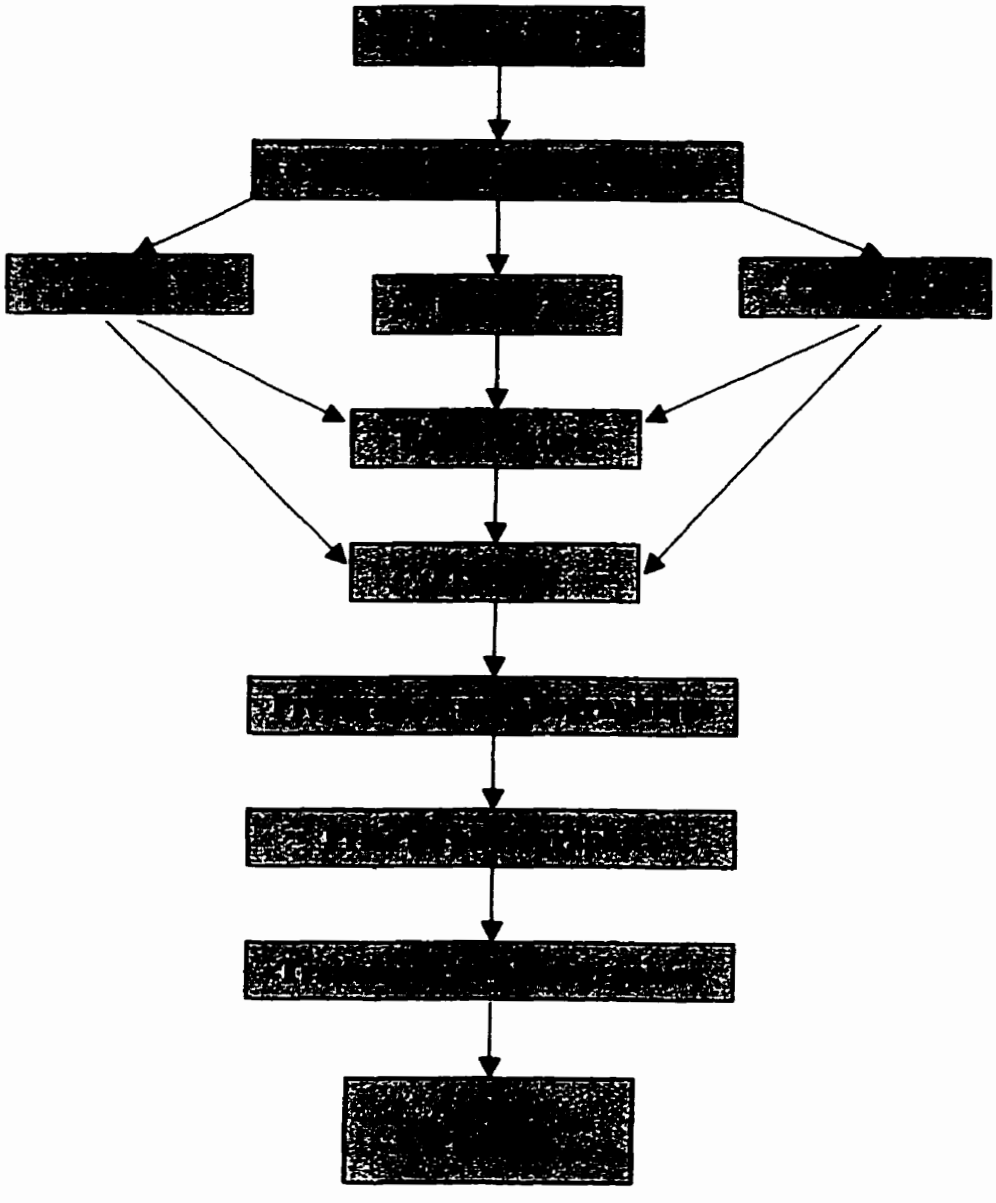
Figure 2.3. Mesure du facteur de forme, $\Phi = \frac{a}{b}$.

CHAPITRE 3

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Dans ce chapitre on fera une description minutieuse des manipulations et des étapes de préparation des échantillons en vue de leur analyse. Afin d'illustrer de manière évolutive les étapes de cette étude, la figure 3.1. présente le plan d'après lequel on a réalisé les expériences. Ainsi, conformément à ce plan, on peut mettre en évidence les groupes d'activités suivantes, qui seront décrites plus loin : la classification dimensionnelle de la poudre de fer (Atomet 1001), la détermination des caractéristiques de chaque classe (densité apparente et vitesse d'écoulement), le mélange et la lubrification de la poudre, la détermination de la densité tassée, le pressage de la poudre sous différentes pressions, la préparation métallographique des échantillons, la prise des photographies, le traitement des photographies et l'analyse d'images incluant la sélection des particules pour l'analyse, la méthode et le logiciel d'analyse et l'interprétation des résultats.

Figure 3.1 Les étapes de l'analyse.



3.1. La classification dimensionnelle de la poudre

Afin de réaliser cette étude, on a utilisé un échantillon de 22,5 kg d'une poudre de fer industrielle (Atomet 1001), ayant les caractéristiques suivantes [MPIF 09-94] :

Tableau 3.1. Caractéristiques de la poudre de fer étudiée:

	Densité apparente (g / cm^3)	Densité tassée (g / cm^3)	Écoulement (s / 50 g)	Angle au repos (degrés)
Atomet 1001	2,94	3,82	26	40,7

La classification granulométrique a été réalisée en respectant le standard 05 de Metal Powder Industries Federation [MPIF 05-92] et en utilisant un ensemble de tamis calibrés, chacun ayant un diamètre de 200 mm et une hauteur de 50 mm. Le calibrage de chacun de ces cinq tamis a été réalisé conformément aux standards américains, ayant les dimensions suivantes : 180 μm (80 mesh), 150 μm (100 mesh), 106 μm (140 mesh), 75 μm (200 mesh) et 45 μm (325 mesh). Un récipient en dessous des différents tamis

permet de récupérer la fraction de poudre qui a des dimensions inférieures à 45 μm. Outre le standard 05 utilisé pour l'analyse par tamisage des poudres métalliques, pour la classification on a aussi tenu compte des standards 01 et 04 de Metal Powder Industries Federation [MPIF 01-95, MPIF 04-92] qui se rapportent à la dimension des échantillons d'analyse et à la détermination de la densité. Ainsi, pour les poudres ayant la densité apparente supérieure à 1,5 g/cm^3 (comme dans le cas présent), la quantité de poudre analysée doit peser autour de 110 g. Le standard 05 précise de même une durée de 15 minutes pour le tamisage mécanique. Après l'écoulement du temps de tamisage, on a obtenu six fractions dimensionnelles. Les particules coincées dans les trous de chaque tamis ont été retirées par une brosse fine. En poursuivant la procédure décrite dans le standard 05, les particules coincées dans le réseau d'un tamis ont été ajoutées à celles du groupe dimensionnel inférieur au tamis duquel elles proviennent. Les classes dimensionnelles obtenues ont été pesées et leur somme devait représenter au minimum 99% de la quantité initiale de l'échantillon. Dans le cas où la différence entre le poids de la poudre initiale et la somme des poids des classes obtenues à la suite du tamisage a été supérieure à 1%, on a répété le tamisage.

Dans l'annexe 1 sont présentées les quantités qui forment les classes de poudre obtenues par le tamisage de la quantité de 22,5 kg de poudre de fer. Les résultats obtenus à la suite de la classification dimensionnelle de la poudre sont présentés dans le tableau 3.2. Sur la base des résultats contenus dans ce tableau, on a pu réaliser une courbe représentant la distribution de taille en fonction du pourcentage de poudre retenue. Cette distribution

cumulative est présentée dans la figure 3.2. Dans la figure 3.3. on a présenté la distribution de taille (log-normale) pour cet échantillon de poudre en ignorant les particules plus grandes de 180 µm plus fines de 45 µm.

Tableau 3.2. : Distribution de tailles d'une poudre tamisée

D Tamis µm	D_{moyen} µm	Log D_{moyen} µm	Retenu G	Retenu %	Cumulatif Passant %
> 180	180	2,25	911,093	4,05	95
> 150	165	2,21	1686,81	7,5	88,45
> 106	128	2,11	5139,929	22,84	65,61
> 75	90,5	1,96	5037,128	22,38	43,23
> 45	60	1,78	5552,274	24,67	18,56
< 45	45	1,65	4176,164	18,56	0

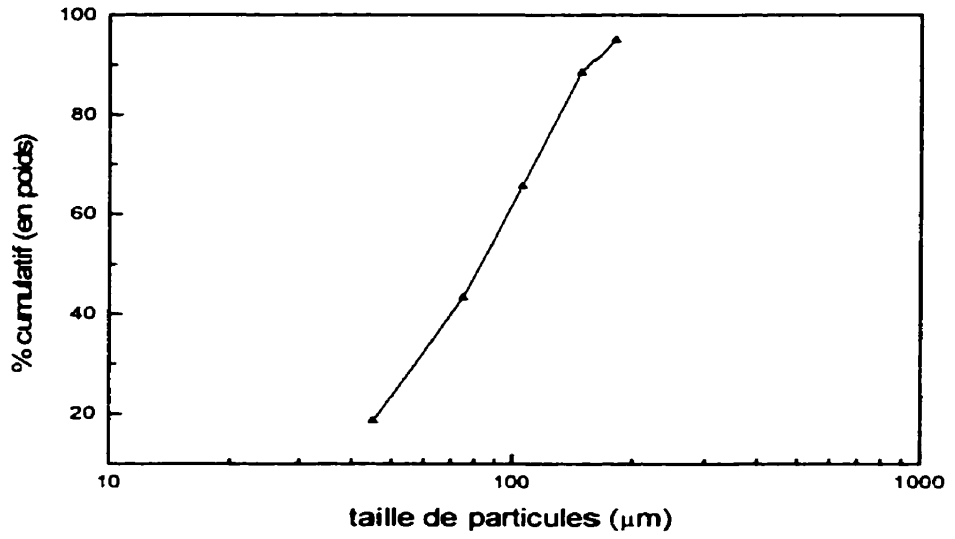


Figure 3.2. Distribution cumulative de taille des particules en fonction du pourcentage en pois de poudre retenue.

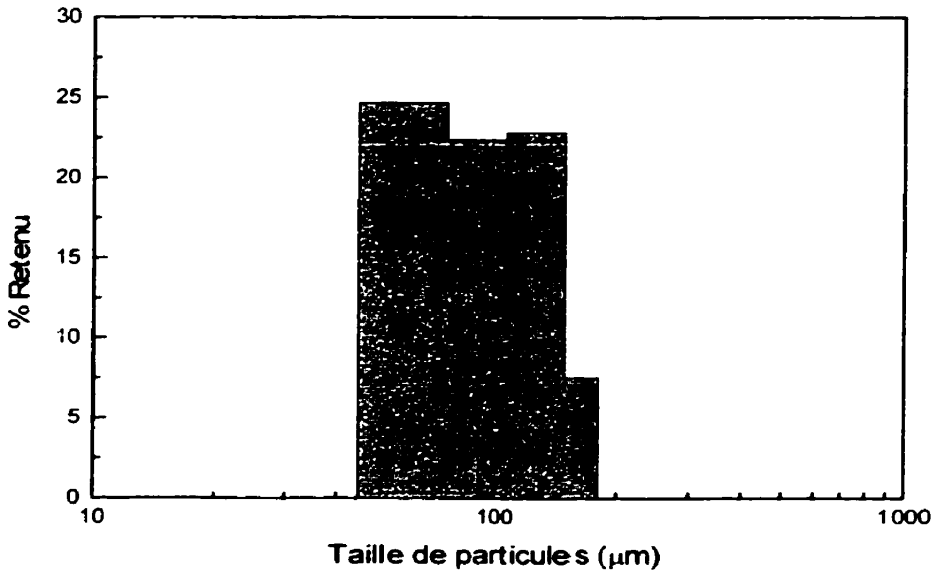


Figure 3.3. Distribution de taille (log-normale) pour l'échantillon de poudre de fer.

3.2. Détermination de la vitesse d'écoulement et de la densité apparente

Pour une meilleure caractérisation des classes de dimension obtenues par le tamisage, on a déterminé aussi la densité apparente de même que le temps d'écoulement de chaque classe, en utilisant la méthode et l'appareil de Hall. Les détails concernant la réalisation de ces mesures sont décrits dans les standards 03 et 04 de Metal Powder Industries Federation [MPIF 03-85, MPIF 04-92].

Par conséquent, on a pesé 50 g de poudre de chaque classe dimensionnelle avec une précision de 0,2 %. Cette poudre a été introduite dans l'entonnoir de l'appareil Hall en gardant obstrué l'orifice de 2,54 mm de celui-ci. Le moment zéro de chronométrage du temps d'écoulement de la poudre est celui de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir. Le chronomètre a été arrêté au moment de l'écoulement de la dernière particule des 50 g pesés initialement.

La détermination de la densité apparente a été réalisée à l'aide du même appareil Hall. On a utilisé en plus un contenant de 25,167 cm^3 (volume déterminé antérieurement en conformité avec le standard 53 de Metal Powder Industries Federation [MPIF 53-92]).

Un volume d'environ 35 cm^3 de poudre de chaque classe dimensionnelle a coulé librement dans l'entonnoir de l'appareil Hall jusqu'au remplissage complet du contenant. Le surplus de poudre du contenant a été retiré à l'aide de la lame d'une spatule. Une fois

connu le volume apparent occupé par la poudre, on a pesé la poudre dans le contenant, obtenant les valeurs de masse (M) pour chaque classe dimensionnelle de poudre. La densité apparente caractéristique pour chaque classe de poudre a été calculée tout simplement en utilisant l'expression : $\rho_a = \frac{M}{V}$.

Les résultats obtenus à la suite de l'application des méthodes décrites ci-dessus sont présentés dans le tableau 3.3. La densité apparente relative, toutes granulométries confondues est de l'ordre de 37%.

Tableau 3.3. Valeurs de la densité apparente et de l'écoulement pour six classes dimensionnelles obtenues par tamisage d'une poudre de fer (Atomet 1001).

Classe µm	Densité apparente g / cm^3	Ecoulement s / 50 g
>180	2,90	34,22
+150 / -180	2,86	34,82
+106 / -150	2,85	32,34
+75 / -106	2,88	30,07
+45 / -75	2,90	30,47
< 45	3,04	NF
Atomet 1001	2,94	30,87

3.3. Mélange de la poudre

Notre étude a traité jusqu'ici la caractérisation de la poudre dans son ensemble de même que celle des six classes dimensionnelles obtenues. En considérant comme variable de l'étude le facteur dimension des particules, on s'est proposé dans cette étude d'analyser le mécanisme de densification des poudres métalliques dans deux situations : 1) Poudre ayant une distribution se rapprochant d'une caractéristique uni-modale par l'utilisation d'une seule classe granulométrique obtenue par tamisage et 2) Poudre ayant une distribution bi-modale des particules. Ainsi, dans le premier cas on a considéré deux classes dimensionnelles, l'une caractérisée par des grosses particules prélevées de la classe +106 / -150 μm, l'autre correspondant aux particules à dimension plus fine provenant de la classe +45 / -75 μm. Pour la seconde situation on se propose d'étudier un mélange de ces deux classes. Le mélange a été réalisé d'après le modèle de remplissage bi-modale afin d'obtenir une densité maximale, tel que décrit par German [GER 94]. On a ainsi déterminé que le pourcentage massique de grandes particules (+106 / -150 μm) dans le mélange formé avec de petites particules (+45 / -75 μm) est de 60,67%.

Le mélange des deux classes dimensionnelles de poudre a été réalisé dans l'air, à la température ambiante, dans un mélangeur en "V", avec deux enceintes de mélange.

Chacune d'elles a été initialement conditionnée pendant 15 minutes avec environ 100 g de poudre qui allait être mélangée en vue de l'homogénéisation.

Après le conditionnement, on a introduit dans chaque enceinte 500 g de poudre dans laquelle on a eu soin de garder le rapport massique de 60,67% de grandes particules et 39,33% de petites particules. Le temps de mélange a été de 30 minutes à une vitesse de rotation de 0,5 rot / s.

3.4. Lubrification de la poudre

Afin d'étudier comparativement l'influence de la lubrification sur l'arrangement des particules, on a convenu de réaliser des comprimés à vert provenant uniquement d'un mélange de poudre de fer avec 1% poids de stéarate de zinc. Le mélange poudre-lubrifiant a été réalisé à l'aide du même mélangeur utilisé pour le mélange des classes de poudres 1 et 2. Afin de simplifier l'exposé, dans ce qui suit on utilisera souvent la dénomination de "Classe 1" comme étant la classe granulométrique à dimension +106 / -150 µm, "Classe 2" pour la classe granulométrique à dimension +45 / -75 µm et "Classe 1+2" comme étant la poudre obtenue à la suite du mélange bi-modale.

Pour lubrifier la poudre, on a respecté quelques conditions nécessaires en vue de l'assurance d'une homogénéité maximale du lubrifiant dans la masse de poudre. Ainsi, dans une première phase, on fait tout comme dans le cas du mélange de deux poudres différentes, un conditionnement de l'enceinte avec la poudre et le lubrifiant qui devaient être mélangés. Ensuite, dans l'enceinte du mélangeur on a introduit d'abord approximativement la moitié de la masse de poudre initiale, avec toute la quantité du lubrifiant. À l'aide d'une spatule métallique on a mélangé les deux manuellement pendant quelques secondes. Cette opération a été nécessaire pour faciliter le mélange entre le lubrifiant et la poudre et aussi pour éviter autant que possible le dépôt de celui-ci sur les parois du mélangeur. On a introduit ensuite dans l'enceinte de mélange le reste des 500 g de la poudre destinée à la lubrification.

À cause de la tendance naturelle du lubrifiant à coller sur les parois de l'enceinte du mélangeur, après quelques minutes de mélange, on a arrêté le mélangeur et à l'aide d'un marteau en caoutchouc, on a appliqué quelques coups à l'enceinte de mélange afin de détacher le stéarate de zinc des parois du mélangeur. Le mélange entre la poudre et le lubrifiant a continué jusqu'à l'écoulement du temps de mélange (30 minutes). Pour chaque classe dimensionnelle de poudre, on a fait un nouveau conditionnement de l'enceinte avec la classe de poudre et le lubrifiant à être mélangés.

3.5. Détermination de la densité tassée

Les détails concernant la réalisation de ces mesures sont décrits dans le standard 46 de Metal Powder Industries Federation [MPIF 46-92].

On a pesé une quantité (approximativement 75 g) de poudre lubrifiée et non-lubrifiée de chaque classe dimensionnelle. La poudre a été introduite dans un cylindre gradué et a été tassée manuellement par des frappes sur la zone inférieure du cylindre. L'opération a été arrêtée au moment où le volume occupé par la poudre dans le cylindre était constant. Cette valeur a été enregistrée pour chaque catégorie de poudre.

Le calcul de la densité tassée a été réalisé tout simplement en utilisant la formule : $\rho_{tassée} = \frac{m}{v}$. Dans cette expression m représente la masse de poudre pesée et v est le volume minimum de la poudre dans le cylindre gradué. Les valeurs de la densité tassée pour chaque classe de poudre sont présentées dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Calcul de la densité tassée pour les trois catégories de poudre utilisée.

Classe de Poudre	Lubrification	Masse [g]	Volume [cm^3]	Densité tassée [g/cm^3]
1	Oui	75,50	23,0	3,28
	Non	74,25	22,5	3,30
2	Oui	70,46	20,05	3,51
	Non	75,02	22,0	3,41
1+2	Oui	70,04	20,5	3,48
	Non	73,53	21,5	3,42

3.6. Pressage de la poudre

Après avoir parcouru les étapes décrites ci-dessus, on a abouti à ce stade de l'étude à six catégories de poudre, plus précisément, les variantes lubrifiées et non-lubrifiées des classes dimensionnelles de +106 / -150 µm, de +45 / -75 µm et du mélange bi-modal (respectivement, les classes 1, 2 et 1+2, définies dans le paragraphe précédent).

Afin d'obtenir une image représentative sur le comportement de la poudre au pressage, on s'est proposé de presser chacune des classes de poudre dans une matrice métallique rigide flottante à quatre pressions différentes. Les quatre pressions sont : 275 MPa (20

tsi), 414 MPa (30 tsi), 621 MPa (45 tsi) et 965 MPa (70 tsi). Pour diminuer les erreurs expérimentales à chaque niveau de pression, deux échantillons ont été pressés pour chacun avec la même masse de poudre d'environ 40 g. La forme de chaque échantillon obtenu a été un parallélépipède ayant les dimensions de la base (plan perpendiculaire à la direction d'application de la pression de densification) de 31,85 mm x 12,8 mm. Il est évident que la hauteur des échantillons produits à des pressions différentes a été variable, oscillant entre 13 mm et 16,5 mm. Dans le tableau 3.5. (3.5.a, 3.5.b, 3.5.c, 3.5.d, 3.5.e, 3.5.f) on présente les caractéristiques des échantillons obtenus par pressage.

Tableaux 3.5. : Caractéristiques des comprimés à vert

Tableau 3.5.a.: Caractéristiques des comprimés à vert pressés de poudre de classe 1 (+106 / -150 μm) lubrifiée.

No.	Masse [g]	Pression [MPa]	Volume [cm^3]	Densité [g/cm^3]	Hauteur [cm]
4	40,07	275	6,16	6,50	1,51
5	40,03	275	6,12	6,54	1,50
6	40,04	414	5,87	6,82	1,44
7	40,06	414	5,87	6,82	1,44
8	40,07	621	5,64	7,10	1,38
9	40,06	621	5,59	7,16	1,37
10	40,05	965	5,46	7,33	1,34
11	40,05	965	5,45	7,34	1,34

Tableau 3.5.b.: Caractéristiques des comprimés à vert pressés de poudre de classe 1 (+106 / -150 µm) non-lubrifiée.

No.	Masse [g]	Pression [MPa]	Volume [cm^3]	Densité [g/cm^3]	Hauteur [cm]
12	40,05	275	6,21	6,45	1,52
13	40,05	275	6,22	6,44	1,53
14	40,06	414	5,88	6,81	1,44
15	40,08	414	5,89	6,81	1,44
16	40,03	621	5,50	7,27	1,35
17	40,06	621	5,51	7,27	1,35
18	40,03	965	5,31	7,54	1,30
19	40,11	965	5,35	7,50	1,31

Tableau 3.5.c.: Caractéristiques des comprimés à vert pressés de poudre de classe 2 (+45 µm /-75 µm) lubrifiée.

No.	Masse [g]	Pression [MPa]	Volume [cm^3]	Densité [g/cm^3]	Hauteur [cm]
20	40,04	275	6,20	6.46	1,52
21	40,00	275	6,21	6,44	1,52
22	39,96	414	5,91	6,76	1,45
23	40,03	414	5,91	6,77	1,45
24	40,02	621	5,68	7,05	1,39
25	39,99	621	5,67	7,06	1,39
26	39,94	965	5,54	7,21	1,36
27	39,98	965	5,55	7,20	1,36

Tableau 3.5.d.: Caractéristiques des comprimés à vert pressés de poudre de classe 2 (+45 µm / -75 µm) non-lubrifiée.

No.	Masse [g]	Pression [MPa]	Volume [cm^3]	Densité [g/cm^3]	Hauteur [cm]
28	39,97	275	6,30	6,35	1,54
29	40,00	275	6,34	6,31	1,55
30	40,01	414	5,93	6,74	1,46
31	40,05	414	5,92	6,76	1,45
32	40,02	621	5,52	7,25	1,35
33	40,00	621	5,51	7,25	1,35
34	40,06	965	5,33	7,51	1,31
35	40,09	965	5,35	7,49	1,31

Tableau 3.5.e.: Caractéristiques des comprimés à vert pressés de mélange de poudres (classe 1+2) lubrifié.

No.	Masse [g]	Pression [MPa]	Volume [cm^3]	Densité [g/cm^3]	Hauteur [cm]
36	40,02	275	6,23	6,43	1,53
37	40,01	275	6,23	6,42	1,53
38	40,05	414	5,89	6,80	1,45
39	40,02	414	5,89	6,79	1,45
40	40,04	621	5,66	7,08	1,39
41	39,96	621	5,66	7,06	1,39
42	40,06	965	5,53	7,25	1,36
43	40,00	965	5,54	7,21	1,36

Tableau 3.5.f.: Caractéristiques des comprimés à vert pressés de mélange de poudres (classe 1+2) non-lubrifiée.

No.	Masse [g]	Pression [MPa]	Volume [cm^3]	Densité [g/cm^3]	Hauteur [cm]
44	39,96	275	6,21	6,44	1,52
45	39,92	275	6,21	6,43	1,52
46	40,03	414	5,88	6,81	1,44
47	40,04	414	5,88	6,81	1,44
48	40,05	621	5,50	7,28	1,35
49	40,02	621	5,51	7,26	1,35
50	40,03	965	5,29	7,57	1,30
51	40,10	965	5,33	7,53	1,31

À partir des valeurs de densité déterminées dans les tableaux 3.5., on a pu réaliser la courbe de pressage caractéristique à chaque catégorie de poudre étudiée. Ainsi, la figure 3.4. présente le graphique Pression / Densité pour les catégories de poudre considérées dans les tableaux 3.5.

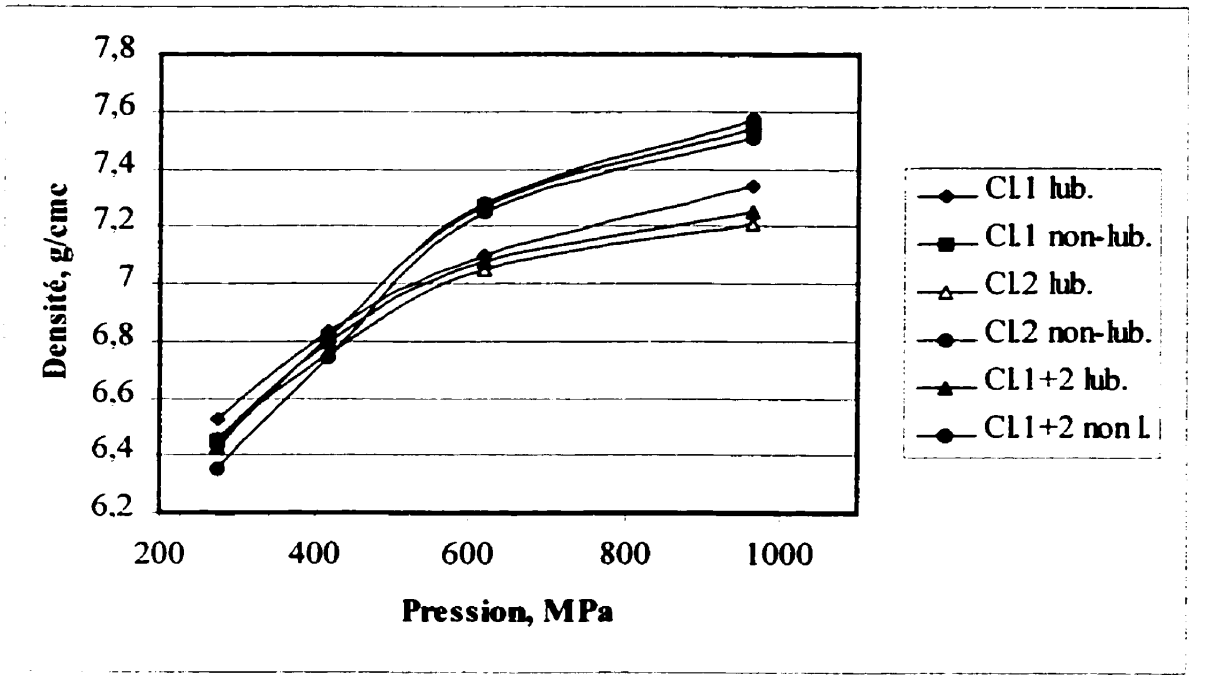


Figure 3.4. Variation entre la pression de pressage et la densité à vert obtenue pour six classes de poudre tamisée.

Vu que dans cette étude on a envisagé essentiellement la déformation des particules dans les comprimés, il est important d'avoir la certitude de la reproductibilité des conditions expérimentales pour le pressage des échantillons. On envisage surtout le niveau et le mode d'application de la pression. En introduisant dans le système de commande de la presse un système informatique de contrôle, on a pu assurer la précision de la valeur de pression, en assurant en plus la pente souhaitée d'augmentation de la pression (0,3 t/s) jusqu'à la valeur maximale.

Étant donné que l'on s'est proposé d'étudier un grand nombre d'échantillons réalisés à partir de poudre non-lubrifiée, il a été nécessaire de lubrifier la paroi de la matrice pour faciliter l'éjection de la pièce. En déposant sur les parois de la matrice avant le pressage une fine couche de graphite, il a été possible d'assurer l'intégrité des comprimés à vert lors de leur éjection de la matrice.

3.7. Préparation des échantillons pour l'analyse d'images

3.7.1. Échantillons imprégnés

Tout comme on l'a mentionné ci-dessus, la présente étude se propose de caractériser la déformation des particules de poudre dans des échantillons à vert obtenus dans de différentes conditions de lubrification, à des pressions diverses. Pour pouvoir faire une appréciation de la déformation des particules d'une poudre métallique, il est nécessaire de connaître la forme et l'arrangement des particules de la poudre étudiée avant leur déformation. Cette situation est caractéristique de l'étape finale d'arrangement de la poudre propre à la courbe de pression / densité, dont on a discuté dans le premier chapitre. La mise en évidence de la disposition des particules dans cet état est difficile à cause des modifications de l'arrangement de celles-ci, même pour des interventions

extrêmement délicates dans la préparation d'échantillons pour l'observation métallographique.

L'utilisation d'une résine polymère qui mouille très bien les particules de poudre, fournit une méthode valable pour fixer et rigidifier les particules dans leur position initiale (densité tassée). À part l'excellente mouillabilité pour les métaux, la résine polymère utilisée a aussi une grande vitesse de séchage.

Un échantillon a été réalisé pour chacune des classes de poudres mentionnées ci-dessus. Initialement, la poudre a été versée librement dans la matrice, ensuite elle a été tassée par une succession de coups appliqués à la matrice. La poudre tassée a été par la suite imprégnée par la résine. L'échantillon numéroté par "1" correspond à celui réalisé à partir de la classe 1, le numéro "2" représente l'échantillon avec des particules de la classe 2 et le numéro "3" correspond à l'échantillon du mélange de poudre de classe 1+2. On a obtenu ainsi les échantillons de référence pour l'étude de la déformation des particules à la suite de la compression. L'aspect d'un tel échantillon est présenté à la figure 3.5.

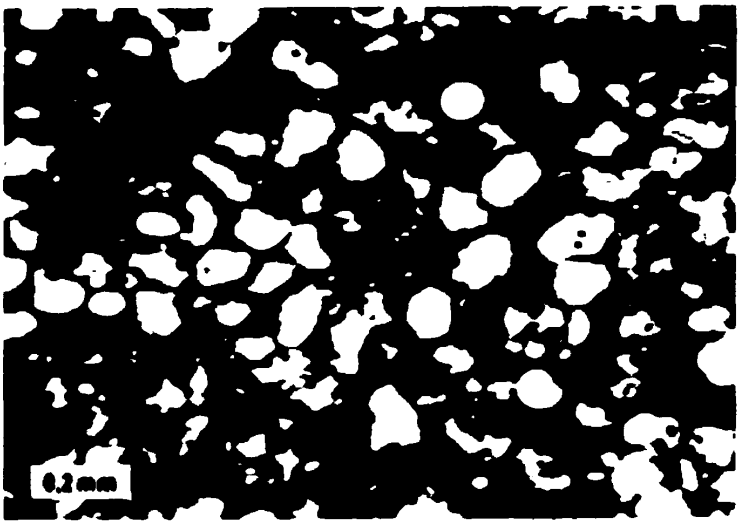


Figure 3.5. : Photographie d'une poudre (+106 / -150 μm) tassée et imprégnée (échantillon coupé et poli).

3.7.2. Échantillons pressés

La présente étude se propose d'analyser la déformation des particules comme effet de l'application de la pression sur la poudre. En analysant le processus évolutif d'une poudre de l'introduction dans la matrice jusqu'à l'étape finale de comprimé à vert, il est facilement visible que la plus grande variation dimensionnelle aura lieu sur la direction de pressage. On suppose par conséquent que chaque particule subira une réduction importante de ses dimensions sur cette direction. Également, en conservant son volume, on présume une augmentation des dimensions de la particule sur le plan radial. La forme

et les dimensions des particules de poudre, le matériau, la lubrification de la poudre et/ou de la matrice peuvent influencer l'écoulement de la poudre pendant le pressage afin que l'augmentation des dimensions des particules ne soit pas toujours dans le plan perpendiculaire à la direction d'application de la pression.

Ainsi, on considère la direction d'application de la pression comme une direction de référence afin d'évaluer la déformation des particules pressées. Par conséquent, les échantillons pressés à la même pression ont été sectionnés en deux, l'un d'après une direction longitudinale (parallèle à la longueur de l'échantillon), l'autre d'après une direction transversale (parallèle à la largeur de l'échantillon), les plans de coupe étant toujours parallèles à la direction d'application de la pression.

L'état à vert des échantillons étudiés est caractérisé surtout par la faible résistance mécanique de ceux-ci. C'est pour cela que la préparation des échantillons par des moyens ordinaires de coupe des métaux est très difficile sinon impossible. Afin de garder l'intégrité des échantillons étudiés, ceux-ci ont été sectionnés à l'aide d'une scie à rotation lente avec une lame diamantée. Bien que le temps de coupe ait été relativement long, cette méthode a permis de réduire au minimum le nombre de particules qui ont été arrachées à la surface de coupe, phénomène probable surtout dans le cas des échantillons obtenus pour des faibles valeurs de pression.

Les échantillons sectionnés ont été ensuite enrobés dans une résine pour assurer une meilleure protection et pour faciliter le polissage ultérieur. Le rôle de la préparation de la surface par polissage est de mettre en évidence les particules de poudre qui ont été déformées à la suite du pressage. Le polissage a été réalisé à l'aide du papier abrasif en étapes successives qui allait d'une taille grossière (60 grit) vers une taille très fine (800 grit) des particules de carbure de silicium. On a continué le polissage des échantillons sur un tapis imbibé d'une émulsion d'alumine dans l'eau. Le polissage de chaque échantillon a été effectué en étapes, alternant avec des observations microscopiques, jusqu'à ce que l'on ait obtenu une surface parfaitement lisse (sans égratignures).

Une attaque chimique en alternance avec du Nital 3% et du réactif Marshall a permis de mettre en évidence le contour des particules de poudre ayant subi une déformation plastique à la suite du pressage. Le choix du réactif a été fait après une longue série d'essais, le but de l'analyse étant de mettre en évidence les limites de particules et non pas les joints de grains à l'intérieur d'une particule qu'on obtient aussi à la suite d'une attaque chimique.

Même avec cette solution d'attaque chimique, il a été nécessaire de faire des polissages et des attaques chimiques successives pour bien mettre en évidence le contour des particules. L'aspect d'un comprimé de poudre préparé d'après la méthode décrite ci-dessus est présenté à la figure 3.6.

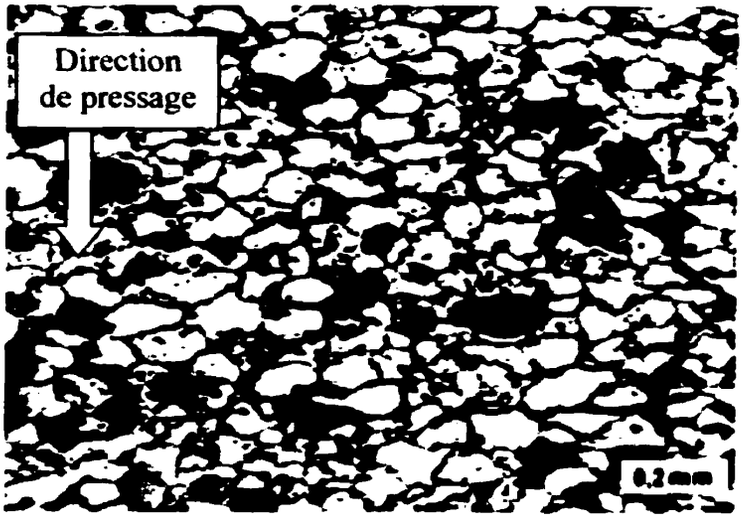


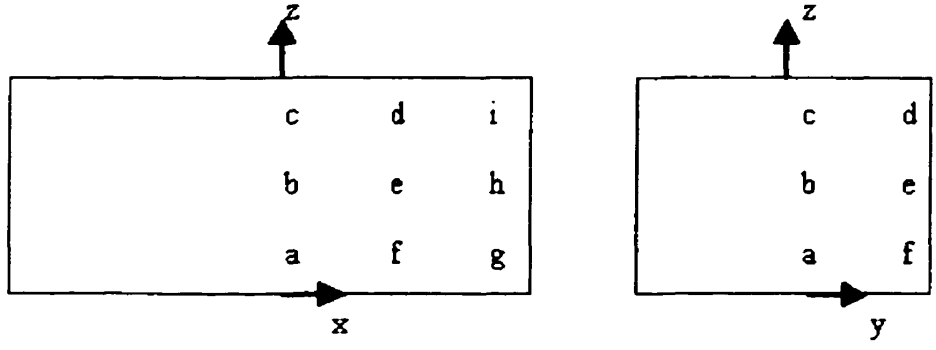
Figure 3.6. Photographie d'un comprimé à vert sectionné dans la région médiane par un plan parallèle à la direction de pressage, préparé pour analyse d'images.

3.8. Prise de photographies

Comme on l'a montré dans le premier chapitre, sur la section du comprimé, il y a une distribution de densité le long des directions longitudinale et radiale. Cette distribution peut être évaluée théoriquement par la détermination de la déformation des particules dans chaque point de la section de l'échantillon étudié. Pratiquement, on a établi certaines zones d'intérêt. Dans ces zones on a fait le calcul du facteur de forme moyen, obtenant ainsi une évaluation qualitative de la déformation des particules. Les emplacements d'intérêt ont été toujours les mêmes quel que fût l'échantillon étudié afin

de pouvoir comparer les échantillons pressés dans différentes conditions. La figure 3.7.a. présente les zones de mesure de la taille des particules sur une section longitudinale; la figure 3.7.b. indique les zones d'intérêt dans le plan de section transversale. Les photographies ont été prises au microscope optique pour des grossissements de 50x pour le calcul du facteur de forme illustrant la déformation des particules.

Les valeurs de 50x pour le grossissement ont été utilisées pour assurer un nombre représentatif de particules sur chaque image, ainsi que pour pouvoir faire des mesures précises des dimensions des particules. Pour la plupart des comprimés, plusieurs photographies ont été prises pour caractériser la même zone, afin d'accumuler un nombre convenable (minimum 200) de particules mesurées.



(a) (b)

Figure 3.7. Disposition des zones d'intérêt dans l'échantillon sur le plan de section longitudinale (a) et sur le plan de section transversale (b). Application de la pression selon l'axe z.

On a accordé une attention particulière à l'emplacement des échantillons sur la table du microscope. Ci-dessus on a montré que pour pouvoir obtenir une théorie valable sur la déformation des particules dans des échantillons à vert pressés dans différentes conditions, on a besoin de déterminer la déformation des particules dans des zones précises. Pour cela, on a établi un point d'origine de la table du microscope sur lequel on a installé deux grilles de mesure du déplacement d'après les directions longitudinale et transversale. En plaçant chaque échantillon avec la zone "a" (figure 3.7.) à l'origine de la table du microscope, le déplacement pour déterminer la zone "b" a été de 5.5 mm, mesuré sur la grille. Le point "c" a été déterminé par un déplacement similaire dans la direction "z". Même si la dimension des échantillons dans cette direction a une légère variation d'un échantillon à l'autre, on a tenu compte de la position relative des zones d'intérêt.

Pour les échantillons sectionnés en direction longitudinale (figure 3.7.a.), le déplacement le long de la direction "x" afin d'identifier les zones d'analyse sur la direction longitudinale a été de 7 mm. De même, pour les échantillons sectionnés transversalement (figure 3.7.b.), le déplacement sur la direction "y" la zone transversale d'analyse a été de 5 mm.

Les photographies ont été prises à l'aide d'une caméra (Sony) destinée à prendre des images sur le microscope optique. Le système a été complété avec un logiciel "Snappy"

pour le traitement d'image et conversion informatique. Les images obtenues pour chaque zone d'intérêt ont été sauvegardées sous la forme de fichiers .TIF .

3.9. Analyse d'images

Les images des micro-surfaces sur le plan de section de l'échantillon à vert ont été analysées en utilisant le logiciel Image Tool de University of Texas Health Science Center de San Antonio, (UTHSCSA) qui est disponible sur le réseau Internet à l'adresse: maxrad6.uthscsa.edu.

Ce logiciel a été conçu afin d'identifier les objets d'une image, de mesurer les caractéristiques des objets identifiés et finalement d'effectuer des calculs. Le programme peut être configuré en fonction des nécessités d'analyse de sorte qu'il identifie dans une certaine gamme dimensionnelle toutes les particules de l'image. Ceci est très important vu que dans l'analyse que l'on va entreprendre, on doit connaître les caractéristiques des particules de grande taille, tandis que les particules fines seront discriminées. Par le même procédé de configuration, on peut imposer au programme la possibilité de calcul de la surface, de l'axe le plus long, ainsi que de la perpendiculaire la plus courte sur celle-ci pour toutes les particules identifiées et numérotées.

L'analyse de chaque image prise sur la section du comprimé à vert a été réalisée en plusieurs étapes. Tout d'abord, par procédure manuelle, on a délimité les particules sur les images sauvegardées antérieurement sous la forme de fichiers TIF. Ainsi, la figure 3.8.A. présente une section d'un comprimé à vert préparé pour analyse ; la figure 3.8.B. présente la même image dont on a numéroté les particules à analyser.

Les particules identifiées ont ensuite été analysées en déterminant aussi bien les facteurs de forme des particules individuelles qu'un facteur de forme moyen, caractéristique de la déformation de l'ensemble des particules de l'image.

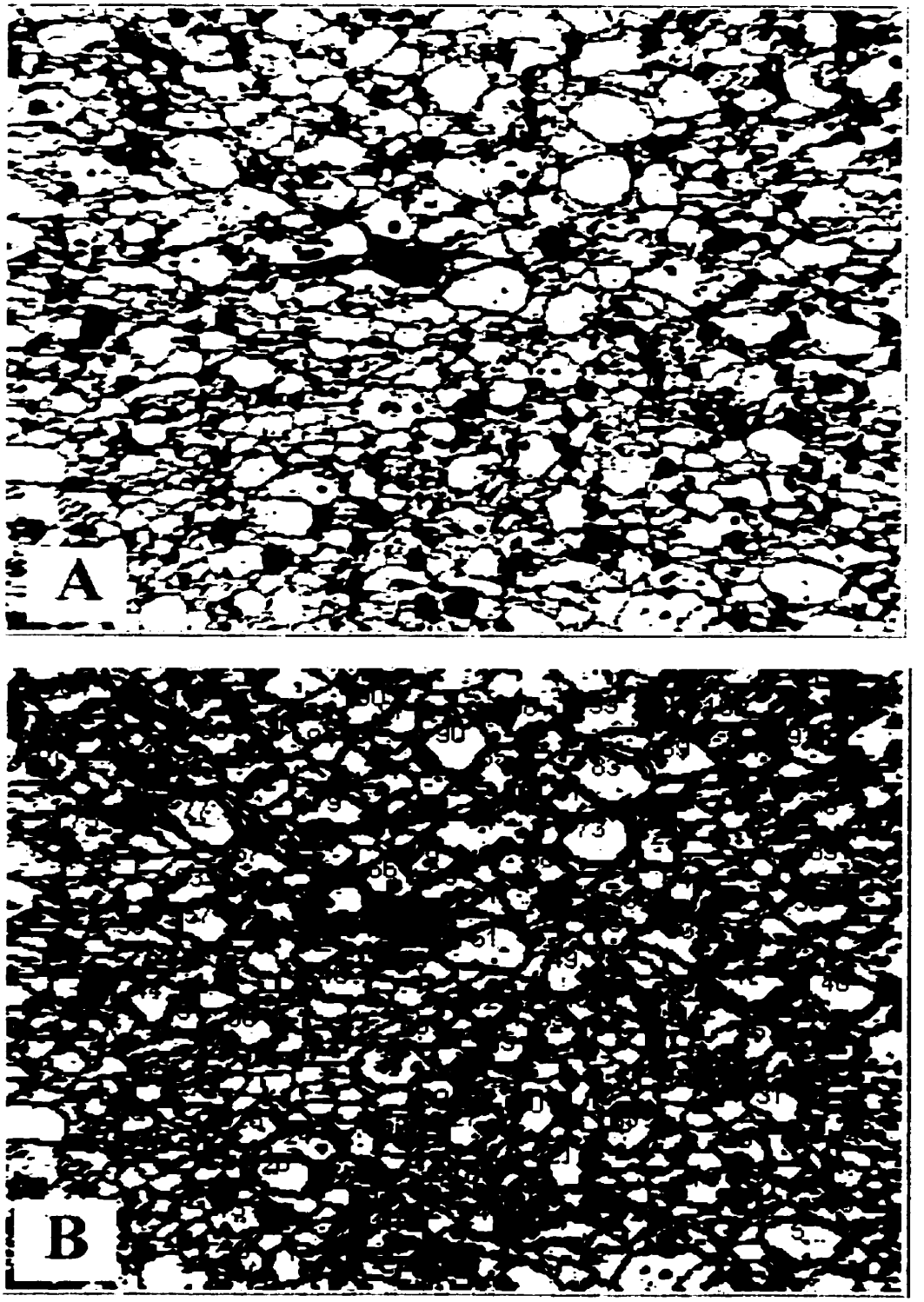


Figure 3.8. : Identification des particules pour la mesure du facteur de forme

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus à la suite des essais expérimentaux, les conditions de leur obtention ainsi que toute une série de considérations sur les limites imposées par ces méthodes.

4.1. Critique du programme d'analyse d'images

Même si le programme d'analyse d'images Image Tool est à même d'identifier, de mesurer et d'analyser les objets d'une image, il ne peut pas toujours satisfaire les exigences spécifiques d'une rigoureuse analyse métallographique. Une explication en est que ce programme a été conçu comme outil de travail pour des recherches dans le domaine médical.

Si dans une analyse biomédicale les objets à analyser représentent des unités (éléments, cellules) ayant des limites (enveloppes) bien définies, ce n'est pas le cas des images

métallographiques. Dans la métallographie, même dans les situations où les images à analyser sont irréprochables du point de vue qualitatif, les contours des particules à analyser ne sont pas toujours caractérisées par une ligne parfaitement continue. La valeur calculée avec Image Tool du facteur de forme des particules ainsi tirées d'une photo subira inévitablement des écarts (donc, des erreurs) de sa valeur correcte.

Soit par exemple un échantillon de poudre comme celui présenté dans la figure 4.1. L'image représente un ensemble de particules de poudre sphériques.

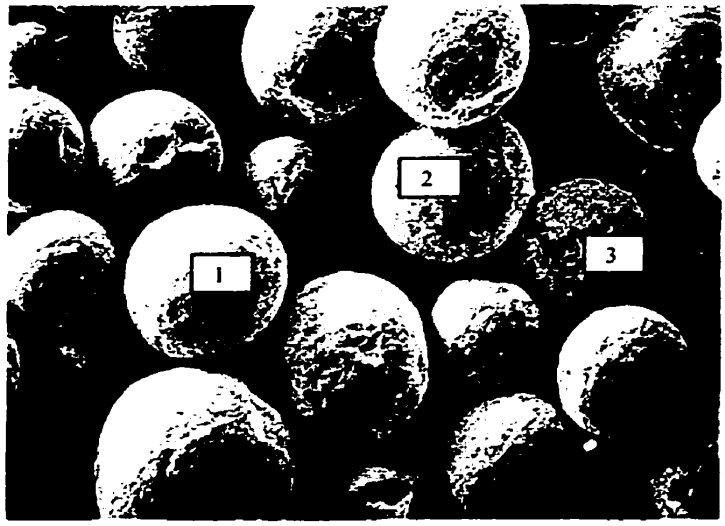


Figure 4.1. Ensemble de particules de poudre sphériques [LEN 80].

En analysant les objets (particules) de l'image à l'aide du logiciel d'analyse d'images, la plupart des particules seront saisies facilement sur une vue de coupe d'un comprimé formé de telles particules, leur forme sphérique étant confirmée aussi par les mesures

réalisées par le programme. Celui-ci ne saura pourtant pas identifier la singularité des particules 2 et 3, qui seront considérées comme unique particule. Il est évident que cette fausse particule aura l'axe majeur égal à la somme des diamètres des particules initiales et l'axe mineur sera représenté par le pont de contact entre les particules 2 et 3 (indiqué dans l'image par une flèche).

Dans une telle situation le facteur de forme de la fausse particule 2 - 3 représentera une valeur numérique très élevée qui entraîne des influences souvent sensibles sur le facteur de forme moyen des particules de l'image analysée.

Cette possibilité de l'apparition de fausses particules doit être envisagée aussi dans le cas de l'analyse des images de certaines sections à travers les comprimés à vert de poudre. Dans ce cas, la condition essentielle pour l'obtention d'un résultat valable est la mise en évidence avec grande précision des limites entre les particules, qui peut être réalisée uniquement par attaque chimique sélective. Même pour des conditions identiques de travail (même poudre pressée, même pression de compression, même classe dimensionnelle, etc.), il est impossible d'obtenir deux images parfaitement identiques à la suite de l'attaque chimique destinée à mettre en évidence les limites entre les particules. Par conséquent il est bien probable de constater l'apparition de différences dans les valeurs du coefficient de forme calculé pour les deux images.

Même dans de telles conditions, le programme Image Tool peut être utilisé avec succès si les contours de particules sont bien délimités et que le nombre de particules de poudre étudiées à partir de l'image saisie soit suffisamment grand. En respectant ces conditions, l'influence des fausses particules sur la moyenne sera plus faible.

On pourrait définir la compression d'une poudre comme la différence entre la densité à vert du comprimé et la densité tassée de la poudre utilisée. En utilisant ce principe, on peut calculer un facteur de forme local à l'intérieur du comprimé. Celui-ci peut être calculé par la différence entre le facteur de forme moyen des particules de poudre dans une zone donnée du comprimé et le facteur de forme moyen de la poudre à l'état tassé correspondant à l'état initial. En analysant plusieurs images de comprimés à vert, il a été visible que pour une poudre de fer obtenue par atomisation, la valeur maximale du facteur de forme obtenu pour des grandes pressions ne dépasse pas 2,5 - 3. Dans de telles conditions, certaines valeurs fortement écartées du facteur de forme moyen obtenu suite à l'analyse d'images peuvent être considérées comme des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent être sélectionnées et éliminées du calcul du facteur de forme moyen des particules de l'image.

À mesure que la taille des particules de poudre diminue, la longueur des contacts entre les particules sur l'unité de surface augmentera sensiblement. En même temps, la difficulté dans l'identification des particules réelles augmentera. Même dans les conditions d'une analyse soignée des échantillons métallographiques, la fréquence

d'apparition des erreurs dans la détermination du facteur de forme des particules analysées sera elle aussi plus grande.

Un autre facteur important lié au logiciel d'analyse d'image est sa configuration. Soit par exemple un comprimé à vert réalisé d'une poudre obtenue par atomisation à l'eau. Dans le plan de coupe on peut observer facilement des sections de particules de différentes dimensions. Ces sections peuvent provenir de plusieurs particules identiques qui ont été sectionnées différemment tel qu'illustré à la figure 4.2.

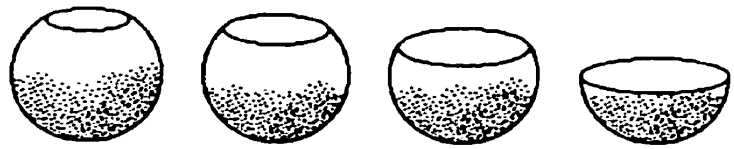


Figure 4.2 : Sections dans une particule sphérique [RUS 90]

De même, dans le cas de compression d'une seule classe dimensionnelle de poudre, les plus petites sections peuvent provenir soit d'un satellite collé à la particule de poudre, soit d'une section à travers une zone ayant une dimension inférieure à la plus grande dimension de la particule. Afin d'éliminer les éléments perturbateurs (petites sections, impuretés ou satellites), Image Tool peut être configuré de telle sorte qu'il saisisse une gamme dimensionnelle précise des surfaces au dessus d'un seuil prédéterminé, par exemple supérieure à 40% de la dimension maximale de la poudre pressée. Cette

approche n'est plus valable dans l'analyse d'un mélange de deux classes dimensionnelles de poudres. En procédant ainsi, on éliminerait du calcul du facteur de forme moyen l'influence de la déformation de la poudre appartenant à la classe dimensionnelle inférieure.

Ainsi, dans le cas d'un mélange de deux classes dimensionnelles de poudre, la même section d'une particule du comprimé à vert peut représenter une tranche marginale d'une particule de la classe dimensionnelle supérieure, un satellite, ou bien une section maximale d'une classe dimensionnelle inférieure. Le calcul du facteur de forme sera fait pareillement pour tous les cas, mais on ne peut pas se prononcer sur la classe dimensionnelle qu'il caractérise. On peut envisager deux possibilités de configuration du programme : 1) que toutes les surfaces inférieures à une certaine valeur (50% de diamètre maximale) caractérisant les particules de grande taille soient discriminées ; dans ce cas on aura la certitude de l'élimination des mesures perturbatrices des satellites, des petites sections ou de la classe dimensionnelle inférieure, ou bien 2) la discrimination uniquement des surfaces ayant un diamètre inférieur à la valeur de 50% de la dimension des particules de la classe dimensionnelle inférieure, en acceptant le risque qu'une grande partie des facteurs de forme mesurés proviennent des satellites ou de petites sections à travers les particules de la classe dimensionnelle supérieure.

Après avoir fait les considérations concernant les surfaces de section dans un comprimé à vert et tenu compte de l'influence perturbatrice des petites surfaces dans le calcul du

facteur de forme des particules déformées, on a considéré préférable la première variante et le programme a été configuré en conséquence.

4.2. Poudre tassée

Une appréciation quantitative complète dans l'étude de la déformation des particules de poudre peut se faire uniquement en connaissant la forme et l'orientation des particules avant et après la compression. Si la forme des particules peut être toutefois évaluée dans les conditions spécifiques au microscope optique, il n'en est pas de même dans le cas de l'orientation des particules. L'orientation des particules ne peut pas être déterminée à travers les moyens d'analyse considérés (analyse d'images), vu que toute intervention nécessaire pour lier les particules de poudre sur des positions fixes afin de réaliser l'analyse a comme effet l'apparition de perturbations dans l'arrangement des particules et entraîne par conséquent des modifications de leur orientation de manière incontrôlable. Il est évident qu'une détermination de l'orientation des particules après leurs imprégnation par une résine donnera une valeur certainement erronée. Cependant, c'est une méthode qui conduit à un état qui pourrait ressembler à l'état d'une poudre tassée.

La détermination du facteur de forme caractéristique aux poudres avant le pressage a été réalisée sur des échantillons de poudre de chaque classe dimensionnelle. L'imprégnation

gravitationnelle de la poudre avec une résine polymère a été faite en vue de la préparation d'échantillons métallographiques. Bien que la résine choisie mouille très bien les particules de poudre, on a pu cependant saisir à l'œil des modifications dans l'état initial de la poudre. À mesure que la dimension des particules de poudre diminue, on a constaté une diminution de la profondeur de pénétration de la résine polymère dans la masse de poudre. Ce phénomène est bien normal, puisque les forces de capillarité s'opposent à la force gravitationnelle. Afin d'analyser un nombre représentatif de particules (plus de 200), plusieurs mesures du facteur de forme ont été faites sur des images provenant de chaque classe dimensionnelle de poudres imprégnées (figure 4.3.).

La valeur obtenue du calcul de la moyenne des facteurs de forme représente la valeur de référence en vue de la détermination du degré de déformation de chacune des classes de poudre. Dans le tableau 4.1, on présente les valeurs des facteurs de forme calculés pour chacune des trois classes dimensionnelles de poudre. Les mesures détaillées à l'aide desquelles on a obtenu ces valeurs sont présentées dans les Annexes 2, 3 et 4.

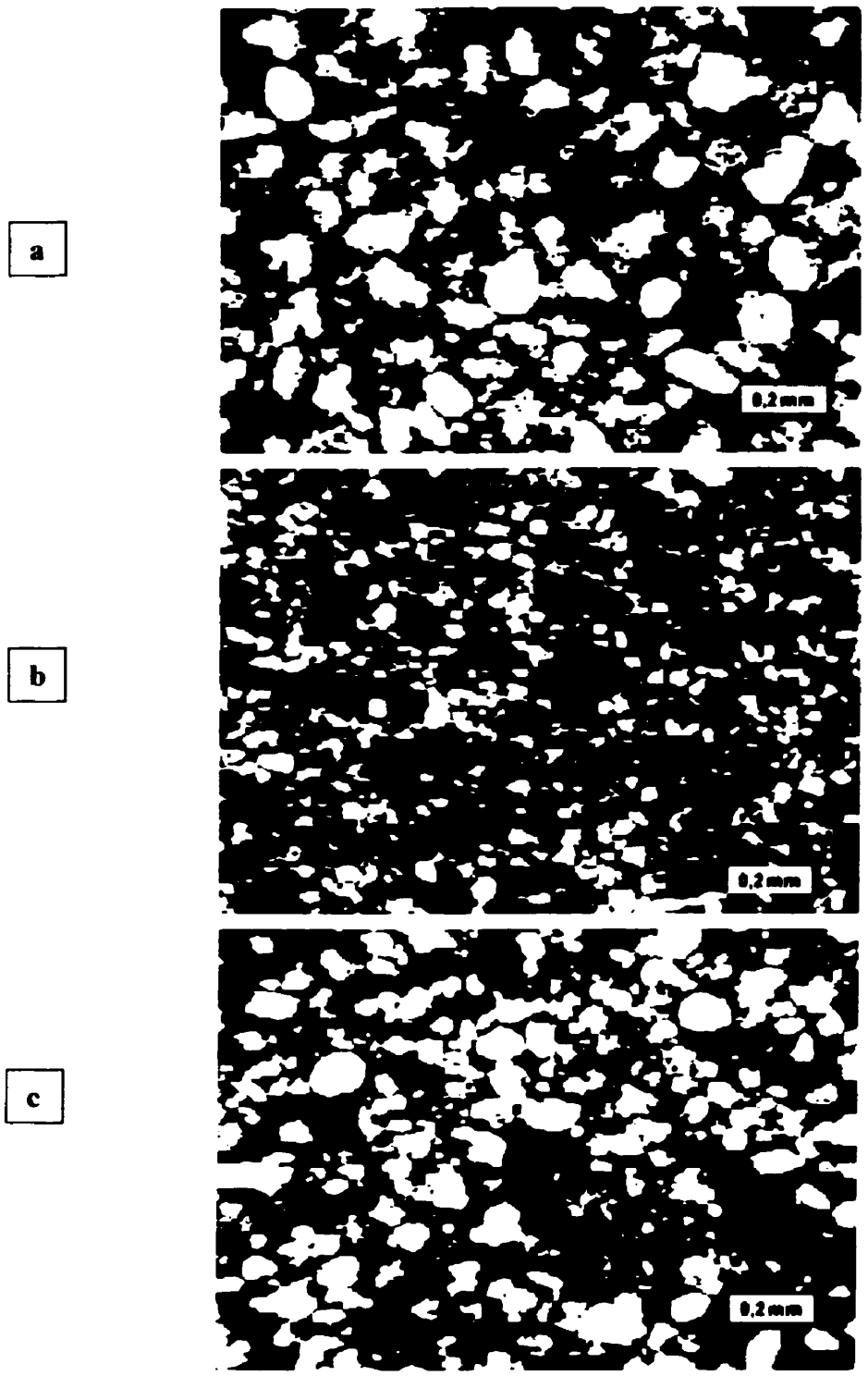


Figure 4.3. : Échantillons sectionnés et polis de poudre (a) de classe 1, (b) de classe 2 et (c) de classe 1+2 sur lesquels ont été réalisés des mesures du facteur de forme.

Tableau 4.1. : Analyse du facteur de forme de la poudre tassée

Poudre Tassée	Échantillon	Aire (pixels)	Facteur de forme
		216,19	1,81
		274,79	1,80
Classe 1	1	308,31	1,73
		342,97	1,78
		302,96	1,88
Moyenne (Échantillon 1)		289,04	**1,8**
Écart Type			**±0,049**
		72,88	2,07
		62,63	1,96
Classe 2	2	66,18	2,06
		61,04	2,04
Moyenne (Échantillon 2)		65,68	**2,03**
Écart Type			**±0,043**
		318,94	1,81
		288,38	1,78
Classe 1 + 2	3	265,71	1,80
		273,37	1,71
Moyenne (Échantillon 3)		286,60	**1,78**
Écart Type			**±0,039**

On observe aisément que les facteurs de forme des trois catégories de poudre ne sont pas significativement différents lorsqu'on tient compte de l'écart type. Cependant, la tendance ascendante du facteur de forme quand la dimension des particules diminue provient de la méthode d'élaboration. Le phénomène d'écart à la forme sphérique des particules à mesure que leurs dimensions diminuent peut s'expliquer en analysant les temps de solidification (équation 4.1) et de sphéroïdisation (équation 4.2.) des particules de poudre atomisées.

Pour l'atomisation au gaz, le temps de solidification est donné par [HAN 84]:

$$\tau_{sol} = \frac{d\rho_m}{6h_c}\left(c_p\right)_m \ln\frac{T_i - T_g}{T_m - T_g} + \frac{\Delta H_m}{T_m - T_g} \qquad (4.1.)$$

d - diamètre de la particule

ρ_m - densité du métal à atomiser

h_c - coefficient de transfert thermique par convection

$\left(c_p\right)_m$ - chaleur spécifique du métal

T_i - température initiale de la particule

T_g - température du gaz de refroidissement

T_m - température de fusion du métal

ΔH_m - chaleur latente de fusion du métal

Le temps de sphéroïdisation est donné par la relation [HAN 84]:

$$\tau_{sph} = \frac{3\pi^2 \mu}{4V\sigma}\left(r_1^4 - r_2^4\right) \qquad (4.2.)$$

où : r_1 - dimension de la particule après la transformation

r_2 - dimension de la particule avant la transformation

μ - viscosité du métal liquide

σ - tension superficielle du métal liquide

V - volume de la particule.

Dans le cas où le temps de solidification est plus long, la forme des particules aura tendance à devenir sphérique. Lorsque, au contraire, le temps de sphéroïdisation est supérieur à celui de solidification, la forme des particules est plus irrégulière. Il faut remarquer que dans les deux cas intervient l'influence de la dimension des particules. Le temps de solidification augmente linéairement avec la dimension de la particule. Par ailleurs, le temps de sphéroïdisation varie différemment avec la dimension de la particule, celle-ci se trouvant incluse dans le terme du volume de la particule. Dans ce cas, l'augmentation de la dimension de la particule aura pour effet de diminuer considérablement le temps de sphéroïdisation. En comparant les équations 4.1 et 4.2, il

est évident que les dimensions des particules auront une plus grande influence sur le temps de sphéroïdisation que sur le temps de solidification. Ceci sera d'autant plus vrai dans le cas de l'atomisation à l'eau où le coefficient de transfert thermique par convection sera plus grand accélérant ainsi la solidification. Ainsi, les particules de dimensions supérieures seront plus proches de la forme sphérique que celles de dimensions réduites.

4.3. Poudre comprimée

4.3.1. Détermination du facteur de forme

Dans le chapitre antérieur, on a présenté les étapes d'analyse ainsi que les caractéristiques de la poudre utilisée pour la classification dimensionnelle (tableaux 3.1 - 3.3). Dans ce chapitre de l'étude, nous présenterons les résultats caractérisant la déformation des particules de poudre à partir de la mesure des facteurs de forme locaux.

Tout comme on l'a déjà montré, on s'est proposé d'étudier trois classes de poudre, qui ont été comprimées à différentes pressions de manière uniaxe dans une matrice

métallique rigide. On a obtenu ainsi des comprimés à vert (étiquetés par chiffres de 4 à 51) qui ont pu être préparés mécaniquement (coupés, polis, etc.) et étudiés par analyse d'images.

Dans les tableaux 3.5. (a - f) sont présentées les caractéristiques des comprimés à vert obtenus par le pressage des trois classes dimensionnelles de poudre à l'état lubrifié et non-lubrifié. Dans le second cas d'état de lubrification, les parois de la matrice de pressage ont été couvertes d'une mince couche de graphite pour faciliter l'éjection du comprimé de la matrice.

Comme on l'a montré précédemment, la détermination du facteur de forme a été réalisée dans des points précis (zones d'intérêt) choisis délibérément sur la section médiane à travers le comprimé à vert, dans son sens longitudinal et transversal (figure 3.7). Afin que le résultat moyen de la mesure par l'analyse d'images soit significatif, il a été nécessaire qu'un nombre suffisamment grand de particules (plus de 200) soit mesuré. Une telle approche à été confirmée par des résultats préliminaires obtenus sur des comprimés cylindriques [JUL 97]. Par conséquent, pour beaucoup de zones d'intérêt étudiées sur la section du comprimé, plusieurs photos ont été prises et analysées. Les facteurs de forme moyens obtenus par l'analyse d'images sont présentés dans l'annexe 6. Les valeurs moyennes des mesures effectuées sur les particules qui appartiennent à la même zone sont présentées dans les tableaux 4.2.

Tableaux 4.2. : Valeurs du facteur de forme sur les sections des comprimés à vert.

(a): Variation du facteur de forme sur la section longitudinale des échantillons pressés de poudre de classe 1 (+ 106 µm / - 150 µm).

No.	P [MPa]	Lub.	Facteur de forme moyen								
			a	b	c	d	e	f	g	h	i
4	275	Oui	2,13	2,17	2,24	2,19	2,17	2,10	2,05	2,10	2,22
6	414	Oui	2,15	2,19	2,22	2,31	2,22	2,15	2,09	2,19	2,36
8	621	Oui	2,24	2,22	2,34	2,33	2,25	2,20	2,18	2,23	2,40
10	965	Oui	2,29	2,31	2,39	2,40	2,35	2,26	2,25	2,41	2,44
12	275	Non	2,10	2,16	2,17	2,25	2,15	2,16	2,01	2,16	2,22
14	414	Non	2,14	2,16	2,20	2,25	2,12	2,10	2,08	2,23	2,34
16	621	Non	2,29	2,26	2,37	2,26	2,27	2,20	2,16	2,26	2,42
18	965	Non	2,23	2,35	2,39	2,33	2,40	2,23	2,20	2,30	2,58

(b): Variation du facteur de forme sur la section transversale des échantillons pressés de poudre de classe 1 (+ 106 µm / - 150 µm).

No.	P [MPa]	Lub.	Facteur de forme moyen					
			a	b	c	d	e	f
5	275	Oui	2,10	2,16	2,24	2,32	2,10	2,06
7	414	Oui	2,09	2,18	2,24	2,26	2,10	2,06
9	621	Oui	2,18	2,25	2,27	2,34	2,23	2,17
11	965	Oui	2,32	2,41	2,44	2,51	2,40	2,21
13	275	Non	2,08	2,13	2,15	2,15	2,13	1,98
17	621	Non	2,21	2,23	2,30	2,49	2,06	2,10
19	965	Non	2,26	2,38	2,41	2,53	2,35	2,22

(c): Variation de facteur de forme sur la section longitudinale des échantillons pressés de poudre de classe 2 (+ 45 µm / - 75 µm).

No.	P [MPa]	Lub.	Facteur de forme moyen								
			a	b	c	d	e	f	g	h	i
20	207	275	2,18	2,16	2,24	2,29	2,10	2,17	2,04	2,24	2,35
22	276	414	2,34	2,45	2,44	2,43	2,35	2,39	2,13	2,37	2,47
24	414	621	2,39	2,38	2,66	2,72	2,65	2,33	2,32	2,65	2,71
26	621	965	2,56	2,55	2,66	2,71	2,63	2,44	2,41	2,65	2,78
28	207	275	2,27	2,28	2,36	2,41	2,31	2,27	2,17	2,32	2,46
30	276	414	2,35	2,45	2,41	2,48	2,46	2,35	2,30	2,35	2,54
32	414	621	2,52	2,54	2,58	2,61	2,53	2,46	2,27	2,52	2,69

(d): Variation du facteur de forme sur la section transversale des échantillons pressés de poudre de classe 2 (+ 45 µm / - 75 µm).

No.	P [MPa]	Lub.	Facteur de forme moyen					
			a	b	c	d	e	f
21	275	Oui	2,21	2,35	2,30	2,55	2,27	2,20
23	414	Oui	2,41	2,45	2,49	2,53	2,33	2,28
25	621	Oui	2,41	2,51	2,51	2,64	2,41	2,37
27	965	Oui	2,50	2,51	2,59	2,65	2,38	2,38
29	275	Non	2,31	2,31	2,35	2,40	2,38	2,25
31	414	Non	2,38	2,40	2,50	2,55	2,27	2,24
33	621	Non	2,47	2,52	2,49	2,66	2,42	2,39
35	965	Non	2,48	2,50	2,63	2,71	2,46	2,41

(e): Variation de facteur de forme sur la section longitudinale des échantillons pressés de mélange de poudres de classe 1 et 2.

No.	P [MPa]	Lub.	Facteur de forme moyen								
			a	b	c	d	e	f	g	h	i
36	275	Oui	2,09	1,9	2,08	2,08	1,99	2,1	1.91	2,06	2,14
38	414	Oui	2,13	2,15	2,21	2,11	2,10	2,04	2,04	2,03	2,24
40	621	Oui	2,23	2,30	2,26	2,15	2,30	2,16	2,05	2,26	2,28
42	965	Oui	2,21	2,28	2,32	2,21	2,21	2,26	2,20	2,23	2,36
44	275	Non	1,90	2,00	1,95	1,98	1,96	1,96	1,92	1,90	2,08
46	414	Non	1,98	2,17	2,03	2,05	1,99	2,01	1,83	1,97	2,23
48	621	Non	2,16	2,26	2,15	2,23	2,23	2,19	2,12	2,23	2,23
50	965	Non	2,14	2,23	2,25	2,21	2,28	2,15	2,12	2,24	2,41

(f): Variation de facteur de forme sur la section transversale des échantillons pressés de mélange de poudres de classe 1 et 2.

No.	P [MPa]	Lub.	Facteur de forme moyen					
			a	b	c	d	e	f
37	275	Oui	2,13	2,15	2,10	2,19	2,11	1,95
39	414	Oui	2,14	2,23	2,24	2,25	2,07	2,03
41	621	Oui	2,25	2,31	2,26	2,27	2,22	2,11
43	965	Oui	2,23	2,24	2,39	2,31	2,36	2,20
45	275	Non	2,08	2,02	2,20	2,22	2,13	2,07
47	414	Non	2,14	2,12	2,14	2,27	2,20	2,08
49	621	Non	2,22	2,28	2,16	2,33	2,27	2,20
51	965	Non	2,18	2,31	2,27	2,43	2,23	2,18

Une représentation plus simple de la distribution des facteurs de forme peut être effectuée en traçant schématiquement les sections longitudinale et transversale a travers les comprimés a vert. Selon la désignation présentée à la figure 4.4, les facteurs de forme moyens sur les sections longitudinale et transversale en fonction des différentes conditions de pressage sont présentés aux figures 4.5 à 4.10. Les valeurs extrêmes du facteur de forme caractérisant la même zone sont aussi représentées. Il est évident que dans les zones où on a eu un nombre suffisant de particules à analyser sur une seule photo on a calculé une seule valeur du facteur de forme.

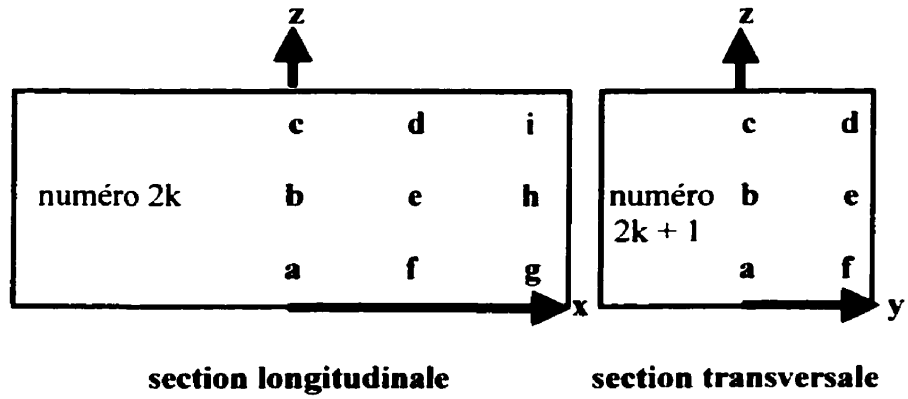


Figure 4.4: Représentation schématique des sections et les endroits de mesure du facteur de forme.

Figure 4.5.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre lubrifiée de classe 1 (+106 µm / -150 µm) ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi).

	$2.24^{+0.03}_{-0.05}$	$2,19^{+0.01}_{-0.01}$	$2,22^{+0.03}_{-0.02}$	$2,24^{+0.03}_{-0.04}$	$2,32^{+0.08}_{-0.08}$
a)	$2,17^{+0.1}_{-0.1}$	$2,17^{+0.02}_{-0.02}$	$2,10^{+0.02}_{-0.02}$	$2,16^{+0.04}_{-0.04}$	$2,10^{+0.1}_{-0.1}$
	$2,13^{+0.05}_{-0.05}$	$2,10^{+0.00}_{-0.00}$	$2,05^{+0.01}_{-0.01}$	$2,10^{+0.0}_{-0.0}$	$2,06^{+0.07}_{-0.07}$
	$2,22^{+0.02}_{-0.02}$	$2,31^{+0.0}_{-0.0}$	$2,36^{+0.01}_{-0.01}$	2,24	2,26
b)	$2,19^{+0.01}_{-0.01}$	$2,22^{+0.01}_{-0.01}$	$2,19^{+0.02}_{-0.02}$	$2,18^{+0.05}_{-0.06}$	2,10
	$2.15^{+0.01}_{-0.01}$	$2,15^{+0.08}_{-0.05}$	$2,09^{+0.08}_{-0.1}$	$2,09^{+0}_{-0}$	$2,06^{+0.01}_{-0.01}$
	$2,34^{+0.02}_{-0.02}$	$2,33^{+0.02}_{-0.03}$	$2,40^{+0.03}_{-0.03}$	$2,27^{+0.09}_{-0.07}$	$2.34^{+0.04}_{-0.04}$
c)	$2,22^{+0.03}_{-0.04}$	$2,25^{+0.0}_{-0.0}$	$2,23^{+0.0}_{-0.0}$	$2,25^{+0.02}_{-0.02}$	$2,23^{+0.06}_{-0.03}$
	$2,24^{+0.09}_{-0.05}$	$2,20^{+0.08}_{-0.08}$	$2,18^{+0.01}_{-0.02}$	$2,18^{+0.06}_{-0.04}$	$2,17^{+0.1}_{-0.06}$
	$2,39^{+0.02}_{-0.02}$	$2,40^{+0.05}_{-0.06}$	$2,44^{+0.0}_{-0.01}$	$2,44^{+0.13}_{-0.14}$	$2,51^{+0.02}_{-0.02}$
d)	$2,31^{+0.0}_{-0.0}$	$2,35^{+0.03}_{-0.03}$	$2,41^{+0.01}_{-0.0}$	$2,41^{+0.05}_{-0.06}$	$2,40^{+0.04}_{-0.08}$
	$2,29^{+0.05}_{-0.04}$	2,26	$2,25^{+0.05}_{-0.05}$	$2,32^{+0.08}_{-0.08}$	$2,21^{+0.05}_{-0.07}$

Figure 4.6.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre non-lubrifiée de classe 1 (+106 µm / -150 µm) ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi).

a)	$2{,}17^{+0.04}_{-0.04}$	$2{,}25^{+0.02}_{-0.02}$	$2{,}22^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}15^{+0.07}_{-0.07}$	$2{,}15^{+0.02}_{-0.02}$
	$2{,}16^{+0.01}_{-0.02}$	$2{,}15^{+0.05}_{-0.06}$	$2{,}16^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}13^{+0.08}_{-0.08}$	$2{,}13^{+0.02}_{-0.02}$
	$2{,}10^{+0.02}_{-0.02}$	$2{,}16^{+0.0}_{-0.01}$	$2{,}01^{+0.02}_{-0.02}$	$2{,}08^{+0.0}_{-0.0}$	$1{,}98^{+0.00}_{-0.01}$
b)	$2{,}20^{+0.06}_{-0.12}$	$2{,}25^{+0.07}_{-0.07}$	$2{,}34^{+0.02}_{-0.02}$		
	$2{,}16^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}12^{+0.07}_{-0.08}$	$2{,}23^{+0.12}_{-0.11}$		
	$2{,}14^{+0.06}_{-0.10}$	$2{,}10^{+0.07}_{-0.07}$	$2{,}08^{+0.05}_{-0.07}$		
c)	$2{,}37^{+0.01}_{-0.02}$	$2{,}26^{+0.04}_{-0.04}$	$2{,}42^{+0.0}_{-0.01}$	$2{,}30^{+0.04}_{-0.05}$	2,49
	$2{,}26^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}27^{+0.02}_{-0.02}$	$2{,}26^{+0.04}_{-0.04}$	$2{,}23^{+0.05}_{-0.05}$	$2{,}06^{+0.0}_{-0.0}$
	$2{,}29^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}20^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}16^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}21^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}10^{+0.03}_{-0.02}$
d)	$2{,}39^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}33^{+0.0}_{-0.01}$	$2{,}58^{+0.03}_{-0.04}$	$2{,}41^{+0.08}_{-0.08}$	2,53
	$2{,}35^{+0.0}_{-0.01}$	$2{,}40^{+0.0}_{-0.01}$	$2{,}30^{+0.05}_{-0.05}$	$2{,}38^{+0.09}_{-0.09}$	$2{,}35^{+0.13}_{-0.13}$
	$2{,}23^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}23^{+0.02}_{-0.02}$	$2{,}20^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}26^{+0.05}_{-0.05}$	$2{,}22^{+0.04}_{-0.04}$

Figure 4.7 : Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre lubrifiée de classe 2 (+45 µm / -75 µm) ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi).

	2,24	2,29	2,35	2,30	2,55
a)	2,16	2,10	2,24	2,35	2,27
	2,18	2,17	2,04	2,21	2,20
	2,44	2,43	2,47	2,49	2,53
b)	2,45	2,35	2,37	2,45	2,33
	2,34	2,39	2,13	2,41	2,28
	2,66	2,72	2,71	2,51	2,64
c)	2,38	2,65	2,65	2,51	2,41
	2,39	2,33	2,32	2,41	2,37
	2,66	2,71	2,78	2,59	2,65
d)	2,55	2,63	2,65	2,51	2,38
	2,56	2,44	2,41	2,50	2,38

Figure 4.8.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre non-lubrifiée de classe 2 (+45 μm / -75 μm) : a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi).

	2,36	2,41	2,46	2,35	$2,40^{+0.02}_{-0.03}$
a)	2,28	2,31	2,32	2,31	2,38
	2,27	2,27	2,17	2,31	2,25
	2,41	2,48	2,54	2,50	2,55
b)	2,45	2,46	2,35	2,40	2,27
	2,35	2,35	2,30	2,38	2,24
	2,58	2,61	2,69	2,49	$2,66^{+0.07}_{-0.07}$
c)	2,54	2,53	2,52	$2,52^{+0.01}_{-0.01}$	$2,42^{+0.04}_{-0.04}$
	2,52	2,46	2,27	$2,47^{+0.03}_{-0.03}$	$2,39^{+0.06}_{-0.05}$
				2,63	2,71
d)				$2,50^{+0.02}_{-0.02}$	2,46
				2,48	2,41

Figure 4.9.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre lubrifiée de mélange de poudres ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi).

	$2{,}08^{+0.11}_{-0.11}$	$2{,}08^{+0.11}_{-0.12}$	$2{,}14^{+0.01}_{-0.0}$	2,10	2,19
a)	$1{,}9^{+0.04}_{-0.04}$	$1{,}99^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}06^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}15^{+0.01}_{-0.02}$	$2{,}11^{+0.05}_{-0.05}$
	$2{,}09^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}1^{+0.1}_{-0.1}$	$1{,}91^{+0.03}_{-0.04}$	2,13	1,95
	2,21	$2{,}11^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}24^{+0.05}_{-0.06}$	$2{,}24^{+0.02}_{-0.03}$	$2{,}25^{+0.0}_{-0.0}$
b)	$2{,}15^{+0.05}_{-0.06}$	2,10	2,03	$2{,}23^{+0.01}_{-0.02}$	$2{,}07^{+0.02}_{-0.03}$
	2,13	2,04	2,04	$2{,}14^{+0.02}_{-0.02}$	$2.03^{+0.05}_{-0.06}$
	2,26	$2{,}15^{+0.05}_{-0.06}$	2,28	$2{,}26^{+0.08}_{-0.08}$	2,27
c)	$2{,}30^{+0.0}_{-0.0}$	2,30	$2{,}26^{+0.18}_{-0.18}$	2,31	2,22
	$2{,}23^{+0.02}_{-0.02}$	$2{,}16^{+0.03}_{-0.03}$	$2{,}05^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}25^{+0.06}_{-0.07}$	2,11
	$2{,}32^{+0.1}_{-0.09}$	$2{,}21^{+0.04}_{-0.04}$	$2{,}36^{+0.01}_{-0.01}$	$2{,}39^{+0.05}_{-0.05}$	2,31
d)	$2{,}28^{+0.10}_{-0.11}$	$2{,}21^{+0.09}_{-0.09}$	$2{,}23^{+0.0}_{-0.0}$	2.24	2,36
	$2{,}21^{+0.05}_{-0.05}$	$2{,}26^{+0.1}_{-0.1}$	$2{,}20^{+0.1}_{-0.1}$	$2{,}23^{+0.02}_{-0.03}$	$2.20^{+0.02}_{-0.02}$

Figure 4.10.: Valeurs numériques du facteur de forme sur des échantillons pressés de poudre non-lubrifiée de mélange de poudres ; a) 275MPa (20 tsi), b) 414 MPa (30 tsi), c) 621 MPa (45 tsi) d) 965 MPa (70 tsi).

	$1{,}95^{+0.03}_{-0.03}$	$1{,}98^{+0.04}_{-0.05}$	$2{,}08^{+0.02}_{-0.02}$	2,20	2,22
a)	$2{,}00^{+0.1}_{-0.1}$	$1{,}96^{+0.15}_{-0.15}$	$1{,}90^{+0.11}_{-0.12}$	$2{,}02^{+0.03}_{-0.03}$	$2{,}13^{+0.02}_{-0.03}$
	$1{,}90^{+0.08}_{-0.07}$	$1{,}96^{+0.25}_{-0.25}$	$1{,}92^{+0.06}_{-0.06}$	2,08	$2{,}07^{+0.04}_{-0.05}$
	$2{,}03^{+0.04}_{-0.05}$	$2{,}05^{+0.03}_{-0.04}$	$2{,}23^{+0.03}_{-0.04}$	2,14	2,27
b)	$2{,}17^{+0.03}_{-0.03}$	$1{,}99^{+0.0}_{-0.0}$	1,97	$2{,}12^{+0.12}_{-0.13}$	$2{,}20^{+0.02}_{-0.02}$
	$1{,}98^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}01^{+0.01}_{-0.01}$	1,83	2,14	$2{,}08^{+0.04}_{-0.04}$
	$2{,}15^{+0.15}_{-0.15}$	$2{,}23^{+0.06}_{-0.06}$	$2{,}23^{+0.04}_{-0.04}$	$2{,}16^{+0.06}_{-0.06}$	$2{,}33^{+0.03}_{-0.03}$
c)	$2{,}26^{+0.09}_{-0.08}$	$2{,}23^{+0.14}_{-0.13}$	$2{,}23^{+0.06}_{-0.07}$	$2{,}28^{+0.02}_{-0.02}$	$2{,}27^{+0.02}_{-0.02}$
	$2{,}16^{+0.01}_{-0.02}$	$2{,}19^{+0.00}_{-0.01}$	2,12	2,22	$2{,}20^{+0.01}_{-0.01}$
	$2{,}25^{+0.01}_{-0.02}$	$2{,}21^{+0.02}_{-0.02}$	$2{,}41^{+0.11}_{-0.11}$	$2{,}27^{+0.08}_{-0.07}$	$2{,}43^{+0.00}_{-0.00}$
d)	$2{,}23^{+0.10}_{-0.10}$	$2{,}28^{+0.18}_{-0.18}$	$2{,}24^{+0.1}_{-0.1}$	$2{,}31^{+0.04}_{-0.04}$	$2{,}23^{+0.02}_{-0.02}$
	$2{,}14^{+0.04}_{-0.04}$	$2{,}15^{+0.0}_{-0.0}$	$2{,}12^{+0.08}_{-0.09}$	$2{,}18^{+0.02}_{-0.02}$	2,18

L'illustration graphique des facteurs de forme dans un espace x y z est représentée dans l'annexe 5. En analysant l'ensemble des représentations ci-dessus ainsi que les graphiques présentés dans l'annexe 5, il est visible une évolution du facteur de forme en fonction de la pression de compression, du mode de lubrification et de la zone d'intérêt dans laquelle on fait la détermination du facteur de forme. Ainsi, à proximité du poinçon mobile dans le plan horizontal on observe une augmentation du facteur de forme du centre vers l'extrémité. Sur le plan vertical, aux extrémités du comprimé apparaît une diminution de la valeur du facteur de forme de la valeur maximale atteinte à proximité du poinçon mobile jusqu'à la valeur minimale enregistrée à la surface du comprimé correspondant au poinçon inférieur de la matrice. Le sens de l'évolution du facteur de forme est moins clair au milieu du comprimé (a - b - c, figure 4.4.). Les évolutions ci-dessus sont d'autant plus évidentes que la valeur de la pression à laquelle on a obtenu le comprimé est plus grande. Cette distribution du facteur de forme est bien corrélée à celle de la densité locale mesurée en différents points sur la section d'un comprimé et telle que rapportée dans la littérature [GER 94, GER 89, HAN 84, FIS 83, JON 60].

Les mesures intermédiaires effectuées sur l'axe d - e - f de la section longitudinale des comprimés (figure 4.4.) sont moins représentatives du point de vue de l'évolution du facteur de forme. Ceci s'explique par l'apparition sur la section du comprimé de certaines iso-valeurs du facteur de forme représentant la déformation irrégulière des particules sur la section du comprimé. L'ordre moins régulier des facteurs de forme

semble indiquer une meilleure uniformité de l'application de la pression dans la région intermédiaire. On observe tout de même une augmentation du facteur de forme pour des pressions appliquées plus grandes. En essayant de déterminer plus exactement les trajets des iso-valeurs à travers la section du comprimé, on a tenté de réaliser dans une première étape des mesures sur deux plages intermédiaires, à gauche et à droite de l'axe d - e - f . Les résultats de cette variante d'analyse ont été peu concluants. Cependant, les facteurs de forme dans la zone intermédiaire ont permis de confirmer l'évolution de la déformation entre la zone centrale et la zone extrême de la section.

Une évaluation qualitative de la déformation des particules peut être faite à partir du facteur de forme. En prenant en considération les valeurs du facteur de forme moyen pour la poudre tassée et le facteur de forme maximal pour la poudre à l'état comprimé, on a pu modéliser les déformations maximales relatives des particules de chaque classe de poudre. On a constaté une déformation plus accentuée des particules de poudre de classe 1 (+106 µm / -150 µm). La déformation des particules de poudre de classe 2 (+45µm / -75µm) et de mélange des poudres a été plus faible (voir tableau 4.3.).

Tableau 4.3 : Déformation relative maximale des particules (section longitudinale) pour chacune des classes de poudre étudiées.

	Poudre Classe 1 $\Phi_{rél} = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{tassée}}{\varphi_{tassée}}$	Poudre Classe 2 $\Phi_{rél} = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{tassée}}{\varphi_{tassée}}$	Poudre Classe 1+2 $\Phi_{rél} = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{tassée}}{\varphi_{tassée}}$
Poudre lubrifiée	0,39	0,33	0,33
Poudre non-lubrifiée	0,43	0,33	0,35

Etant donné que la poudre de classe 1+2 a une composition qui engendre une densité relative maximale, le résultat expérimental indiqué dans le tableau 4.3 est normal. Les plus fines particules insérées dans les sites entre les particules aux plus grandes dimensions ont certainement empêché leur déformation ; par conséquent, le facteur de forme moyen mesuré sur des particules de poudre de classe 1+2 doit avoir des valeurs plus faibles que dans le cas des particules de classe 1.

4.3.2. Effets du pressage

On a remarqué que l'application de différentes valeurs de pression sur une poudre industrielle de fer obtenue par atomisation a eu comme conséquence l'obtention de comprimés ayant des caractéristiques et des propriétés tout à fait différentes. Ces propriétés sont dues notamment à la présence des porosités. Dans des conditions réelles, le frottement réciproque entre les particules ainsi que le frottement entre les particules de poudre et les parois de la matrice sont les principaux effets dynamiques influençant l'application uniforme de la pression. Il est évident par conséquent que la dimension et la forme des particules comprimées ainsi que l'état des surfaces en contact pendant le pressage sont très importants. C'est pour cette raison que les poudres étudiées ont été analysées à l'état non-lubrifié et lubrifié par mélange avec du stéarate de zinc.

En jetant un regard sur les comprimés de poudre obtenus à basse pression (275 MPa), dans le cas de la poudre de la classe 1 par exemple, deux aspects sont visibles : 1) des valeurs relativement uniformes des facteurs de forme sur la section du comprimé de poudre lubrifiée et 2) des valeurs légèrement plus faibles des facteurs de forme dans le cas de la poudre non-lubrifiée comparée à celle lubrifiée (annexe 5, échantillons 4, 5, 12, 13). Dans les situations présentées, la pression s'est dissipée dans la masse de poudre,

favorisant tout d'abord le réarrangement des particules et par la suite leur déformation, caractérisée par les valeurs des facteurs de forme. Le fait que ces valeurs soient plus faibles dans le cas des comprimés non-lubrifiés s'explique par le "retard" de début de la déformation des particules non-lubrifiées par rapport à celles de l'échantillon lubrifié. L'absence du lubrifiant entraîne un glissement réciproque entre les particules plus difficile et, par conséquent, une transmission moins efficace de la pression dans la masse de poudre.

Pour une pression appliquée de 414 MPa, les valeurs des facteurs de forme ne sont pas beaucoup plus grands par rapport au pressage à 275 MPa. Cependant, une augmentation du facteur de forme est visible dans les zones situées vers l'extrémité du comprimé, juste sous le poinçon mobile et à proximité des parois de la matrice (exemple: annexe 5, échantillons 6, 7 et 14). Ce sont les zones où la pression est la moins atténuée par le frottement provoquant un mouvement relatif maximal entre les particules de poudre comparé au reste du volume du comprimé. D'ailleurs, pour la plupart des cas, des valeurs maximales de facteurs de forme ont été obtenues dans ces zones. Dans le cas des échantillons non-lubrifiés, le frottement réciproque entre les particules et celui entre les particules et les parois de la matrice entraînent même une stratification de la déformation des particules. Ainsi, dans la zone supérieure, à proximité du poinçon mobile, on a constaté des valeurs maximales des facteurs de forme. Les valeurs minimales des facteurs de forme ont été mesurées dans la zone inférieure du comprimé à proximité du fond de la matrice tandis qu'à la mi-hauteur on a mesuré des valeurs intermédiaires.

À 625 MPa, l'absence du lubrifiant met en évidence une non-uniformité plus prononcée du gradient des facteurs de forme sur la section du comprimé comparé au cas des comprimés lubrifiés (annexe 5, échantillons 8, 9, 16, et 17). Cette non-uniformité est accentuée par la présence du graphite sur les parois de la matrice. Jouant un rôle de lubrifiant local, le graphite rend plus facile le glissement des particules sur les parois de la matrice pendant le pressage. Ce n'est pas le cas des particules à l'intérieur du comprimé; en absence de lubrifiant, le frottement réciproque entre les particules empêche la transmission de la pression dans la masse de poudre et, par conséquent, la déformation des particules.

Les valeurs des facteurs de forme les plus élevées ont été obtenues à la pression de compression de 965 MPa, comme on l'avait d'ailleurs prévu (annexe 5, échantillons 10, 11, 18, et 19). À cette pression, on constate que sur la section du comprimé il y a une tendance de stratification horizontale des iso-valeurs de déformation, les valeurs numériques des facteurs de forme n'étant pas essentiellement différentes. Ce comportement pourrait s'expliquer en envisageant la valeur élevée de la pression transmise vers la poudre en présence du lubrifiant. De plus, la valeur réduite du rapport hauteur sur diamètre du comprimé fait que l'influence négative du frottement sur les parois de la matrice soit diminuée et, par conséquent, la distribution de pression dans la masse de poudre dans un plan perpendiculaire à la direction de pressage serait plus uniforme.

La déformation plus difficile des particules dans les comprimés non-lubrifiés par rapport aux comprimés lubrifiés est appréciée, ainsi que dans les cas déjà mentionnés, par les valeurs désordonnées et variables des facteurs de forme mesurés dans les zones d'intérêt.

Comme on l'a déjà constaté, la poudre de classe 2 est caractérisée par des valeurs générales élevées des facteurs de forme dès l'état tassé. La faible dimension des particules fait que la surface spécifique des particules est plus élevée et le nombre de contacts entre les particules est plus grand. Suite à l'application de la pression, le frottement entre les particules sera plus important et, par conséquent, la déformation des particules sera plus faible, surtout au niveau du poinçon inférieur. D'ailleurs, dans le paragraphe précédent (tableau 4.3), on a déjà montré, que la variation relative moyenne de facteur de forme des particules de petites dimensions est inférieure à celle des particules de classe granulometrique supérieure.

Tout comme dans le cas de la poudre de classe 1, l'influence du lubrifiant dans la déformation des particules de poudre de classe 2 continue à se manifester, mais de façon moins évidente. Dans le cas des sections longitudinales et transversales à travers les comprimés à vert obtenus à 275 MPa, les observations sont semblables à celles faites pour la poudre de classe 1. Par ailleurs, l'augmentation de la pression à 414 MPa amène une stratification de la déformation des particules de poudre de classe 2 (échantillons 24, et 32). Ainsi on constate une déformation plus faible dans la partie inférieure du

comprimé et une déformation importante dans sa partie supérieure, surtout à proximité du poinçon mobile et aux extrémités, près des parois de la matrice (échantillons 24, et 25). Vu qu'il s'agit d'une poudre qui a été lubrifiée, l'explication est que l'effet du lubrifiant diminue à mesure que le nombre de contacts entre les particules de poudre augmente en réduisant la classe granulométrique de la poudre comprimée.

À la suite de l'analyse d'une section à travers un comprimé de poudre de classe 2 à l'état non-lubrifié, on obtient parfois un écart significatif des valeurs du facteur de forme. Par ailleurs, on obtient des valeurs uniformes du facteur de forme dans des zones d'intérêt voisines surtout dans les régions centrales du comprimé. Cette situation apparaît comme un effet simultané du graphite sur les parois de la matrice (lubrification des particules en contact avec les parois de la matrice) et du frottement entre les particules non-lubrifiées de la masse de poudre pressée. (exemple: échantillon 32 et 33, annexe 5).

La troisième classe de poudre étudiée a été celle obtenue du mélange des deux classes granulométriques présentées précédemment (classe 1+2). Les petites particules du mélange occupent les espaces restés libres entre les grandes particules depuis l'étape d'arrangement caractérisant le tassage à partir de la densité apparente. En augmentant la pression, le nombre de coordination entre les particules augmente progressivement et le glissement réciproque entre les particules devient de plus en plus difficile. De plus, du fait que les espaces disponibles entre les grandes particules aient été occupés par les particules de petites dimensions, la déformation générale des particules suite à

l'augmentation de la pression est plus difficile. L'effet de ce comportement est visible dans les valeurs générales plus faibles du facteur de forme par rapport à celles des comprimés de poudre de classe 1.

Généralement, en effectuant les mesures des facteurs de forme sur les sections longitudinale et transversale des comprimés de poudre, on a constaté une évolution plus rapide de la densification (obtention de facteurs de forme plus élevés même pour des pressions de compression relativement faibles) sur la direction transversale que sur la direction longitudinale. Étant donné que la longueur du comprimé est d'environ trois fois plus grande que la largeur, il est facile d'imaginer que sur la direction transversale le nombre des particules (donc le nombre de contacts influençant le frottement) est plus petit. Par conséquent, pour la même valeur de la pression de pressage, le mouvement absolu des particules sera plus faible et leur déformation sera plus facile sur la direction transversale que sur la direction longitudinale.

De même, dans les cas des sections transversales, les valeurs réduites et parfois désordonnées des facteurs de forme sont maintenues à cause de l'absence de la lubrification.

4.4 Modélisation

La variation de déformation des particules dans divers points de référence du volume du comprimé engendre évidemment l'apparition de variations importantes de densité dans le volume de la pièce comprimée. Tout comme on l'a déjà montré, en utilisant le facteur de forme, on a pu faire une évaluation de la déformation des particules du comprimé de poudre pressée. Dans ce qui suit, on s'est proposé d'établir une relation de dépendance entre les valeurs mesurées du facteur de forme et la densité à vert du comprimé.

La relation entre la densité ρ_{exp} d'un comprimé de volume V déterminée expérimentalement et les densités locales homogènes ρ_x des n volumes élémentaires v_x est:

$$\rho_{exp} V = \sum_{x=1}^{n} \rho_x v_x \qquad (15)$$

À la densité du comprimé contribue d'une part la densité initiale (tassée) $\rho_{tassée}$ de la poudre et d'une autre part le gain de densité obtenu comme effet de l'application de la pression sur la poudre. Ainsi la relation (15) peut être écrite :

$$\rho_{exp} V = \sum_{x} v_x (\rho_{tassée} + \Delta\rho_x) \qquad (16)$$

Dans la relation (16) la densité tassée est une constante et la sommation des volumes élémentaires représente le volume V du comprimé. De plus, par pressage on obtient l'augmentation de densité dans la masse de poudre suite à la déformation des particules de poudre. On ne connaît pas exactement la façon dont le facteur de forme moyen d'un comprimé à vert variera avec sa densité. Il est certain par ailleurs que les deux variables vont évoluer dans le même sens, plus la variation du facteur de forme mesuré est grande, plus la densité d'un comprimé augmente. Comme hypothèse, on suppose d'abord que la relation entre la densité d'un certain volume et le facteur de forme moyen des particules déterminé expérimentalement, sera considérée comme linéaire (figure 4.11). Ainsi, les densités dans l'état initial (tassé) et celle obtenue pour un état x pendant le pressage peuvent être décrites en fonction des valeurs du facteur de forme à l'état tassé ($\Phi_{tassé}$) et à l'état x (Φ_x) par :

$$\rho_{tassée} = C\Phi_{tassée} + B$$

$$\rho_x = C\Phi_x + B$$

Le gain de densité entre les deux états pendant le pressage sera alors (figure 4.11) :

$$\Delta\rho_x = \rho_x - \rho_{tassée} = C(\Phi_x - \Phi_{tassée}) = C\Delta\Phi_x \qquad (17)$$

Dans la relation (17) $\Delta\Phi_x$ représente la variation du facteur de forme moyen de chaque volume élémentaire v_x de l'état tassé jusqu'à l'état x. On a noté avec C une expression faisant le lien entre la densité et le facteur de forme caractérisant la déformation des particules. Il est évident que la pression, le type de poudre et la lubrification sont des facteurs qui influencent la valeur de C. Nous considérons dans un premier temps que la valeur de C est constante pour une poudre et une pression appliquée données.

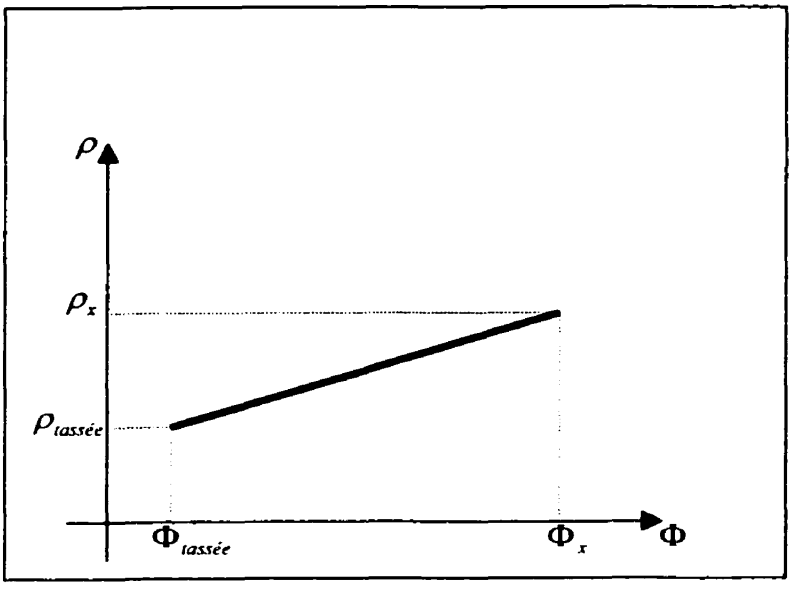


Figure 4.11 : Variation de densité entre l'état initial (tassé) et celle obtenue a l'état x pendant le pressage.

Tenant compte de ces considérations, la relation (16) deviendra :

$$(\rho_{exp} - \rho_{tassée})V = C\sum_{x=1}^{n}(\Delta\Phi_x v_x) \qquad (18)$$

ou bien,

$$C = \frac{(\rho_{exp} - \rho_{tassée})V}{\sum_{x=1}^{n}(\Delta\Phi_x v_x)} \qquad (19)$$

Dans la relation (19), il est visible que si tous les v_x sont égaux, les volumes vont s'annuler et C dépendra seulement des densités expérimentale et tassée et de l'augmentation du facteur de forme moyen de l'état initial (tassé) jusqu'à l'état final (pressé). De cette façon, C représente plutôt une caractéristique de la poudre et des conditions de pressage (pression appliquée, conditions de lubrification, etc.) qu'une caractéristique du comprimé à vert (volume, forme, etc.) obtenu suite au pressage.

Bien que la détermination de la valeur de C soit importante, elle représente seulement une étape pour atteindre le but de calculer la densité des comprimés en utilisant les mesures des facteurs de forme déterminés par analyse d'images. Après qu'on ait déterminé la valeur de C caractérisant la poudre et les conditions de pressage, on peut

ensuite utiliser la relation (18) pour calculer la densité moyenne d'un comprimé de géométrie quelconque :

$$\rho_{calculé} = \rho_{tassée} + \frac{C_{exp}}{V} \sum_{x=1}^{n} (\Delta\Phi_x v_x) \qquad (20)$$

4.4.1 Détermination de C

En utilisant les valeurs des densités, volumes et facteurs de forme (Tableaux 3.4., 3.5., 4.1. et 4.2.) caractérisant les comprimés à vert décrits au paragraphe 3.6, on a pu calculer les $\Delta\Phi_x$ et ensuite les valeurs de C pour chaque classe de poudre (Tableau 4.4). Il est intéressant de constater qu'à l'état lubrifié ainsi que non-lubrifié, il y a une tendance de diminution de C avec l'augmentation de la pression pour toutes les catégories de poudre.

La façon dont les particules se déforment sous l'effet de la pression influence aussi les valeurs de C. Soit par exemple une faible valeur de pression appliquée. Les particules de poudre de grande taille (classe 1) vont commencer à se déformer avant celles de petite taille (classe 2) qui seront encore dans l'étape d'arrangement. On constate ainsi une densification plus prononcée de la poudre de classe 1 que de la poudre de classe 2, (les valeurs de $\Delta\Phi_x$ dans la relation (19) seront supérieures pour la poudre de classe 1 que

pour celle de classe 2). Par conséquent, les valeurs de C seront plus faibles pour la poudre avec des particules à grande taille. Ce comportement est bien visible dans le tableau 4.4. et dans la figure 4.12. Pour des plus grandes valeurs de pression, les différences entre les valeurs de C caractérisant les trois classes de poudre deviennent moins visibles. Ce comportement fait que pour les applications pratiques à des pressions dépassant 400 MPa, C peut être considéré constant.

Tableau 4.4: Valeurs calculées de C pour les trois classes de poudre utilisées.

No. Ech.	Classe	Lubrification	Pression [MPa]			
			275	414	621	965
4	1	Oui	9,23			
6				8,68		
8					8,21	
10						7,46
12		Non	8,92			
14				9,24		
16					8,33	
18						7,9
20	2	Oui	17,7			
22				9,44		
24					7,02	
26						6,50
28		Non	10,26			
30				8,76		
32					7,77	
36	1+2	Oui	11,39			
38				9,86		
40					8,16	
42						7,96
44		Non	16,67			
46				13,62		
48					9,19	
50						9,31

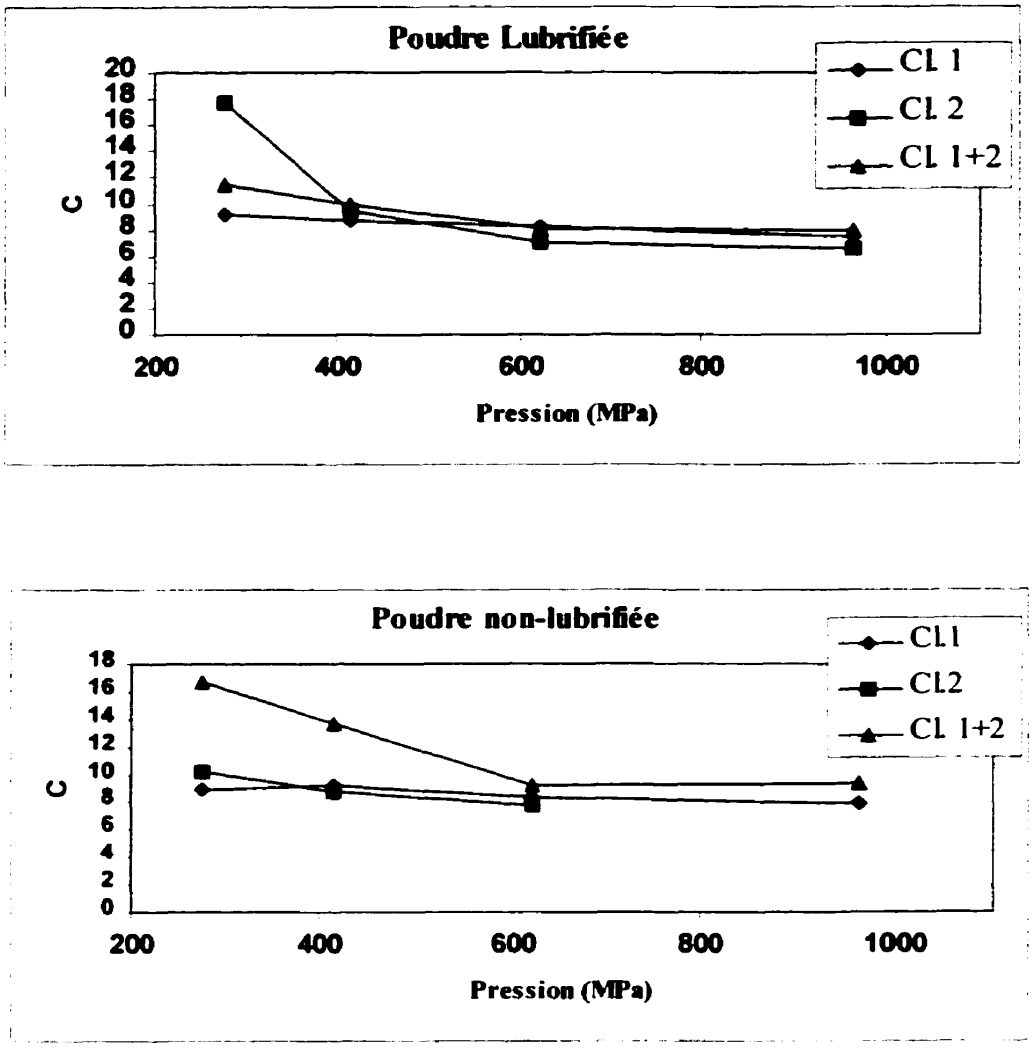


Figure 4.12. Variation avec la pression du paramètre C pour l'état lubrifié et non-lubrifié de trois catégories de poudre : classe 1 (+ 106 µm / - 150 µm), classe 2 (+ 45 µm / - 75 µm) et classe 1 + 2.

4.4.2 Validation de la méthode

Pour vérifier la validité du calcul de densité décrit plus haut, on a utilisé deux échantillons pressés dans deux matrices différentes. Par ailleurs, les conditions de pressage ont été les mêmes: la poudre utilisée, la lubrification, ainsi que la pression appliquée. Un échantillon a été utilisé pour déterminer le facteur C qu'on va appeler C_{exp}. Pour le deuxième échantillon on a calculé sa densité en utilisant le C_{exp} et les mesures du facteur de forme sur une section médiane parallèle à la direction d'application de la pression.

Ainsi, on a choisi l'échantillon obtenu par le pressage à 621 MPa de la poudre lubrifiée de classe 1+2 (figure 4.13.) pour déterminer le C_{exp}. La raison de ce choix à été une meilleure précision et une plus grande facilité de déterminer la déformation des particules de poudre pressée. De plus, le pressage de mélanges de particules fines et grossières correspond à la plupart des situations pratiques.

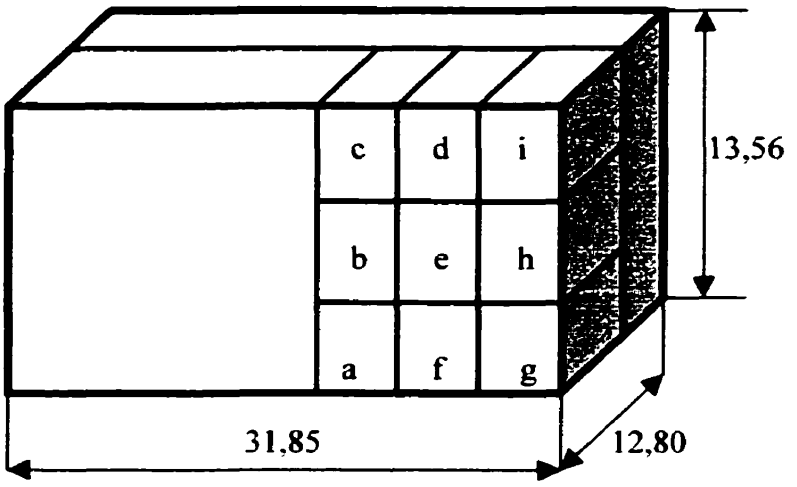


Figure 4.13. Comprimé à vert; plan de section et volumes élémentaires

La validation a été effectuée sur une pièce de forme différente afin de confirmer l'intérêt de l'approche. Suite au pressage de 20 g de poudre dans une matrice cylindrique, on a obtenu un comprimé de 1,01 cm de hauteur et de 1,9 cm de diamètre. De la même façon que pour les échantillons en forme de parallélépipède, les facteurs de forme des particules déformées ont été déterminés sur une section médiane du comprimé cylindrique. Pour mettre en évidence les facteurs de forme sur les zones d'intérêt de l'échantillon, on a suivi les étapes de préparation décrites dans le chapitre 3. La particularité dans ce cas est représentée par la distribution des volumes élémentaires dont on mesure les facteurs de forme (figure 4.14). Ainsi, des volumes élémentaires de forme cylindrique ayant le diamètre de 0,63 cm et la hauteur de 0,34 cm correspondent

aux zones d'intérêt a - b - c. Les zones d'intérêt d - e - f de la section correspondent aux volumes élémentaires en forme d'anneau, ayant des rayons intérieur et extérieur de 0,63 cm et 1,9 cm et la même hauteur que les volumes élémentaires cylindriques (0,34 cm).

Les facteurs de forme caractérisant chacune des zones d'intérêt du comprimé cylindrique ont été déterminés en utilisant le logiciel d'analyse d'images UTHSCSA Image Tool avec la même configuration que pour les mesures réalisées sur le comprimé 42. En considérant la distribution des zones d'intérêt de la figure 4.14, on présente les valeurs mesurées des facteurs de forme caractérisant chaque volume élémentaire à la figure 4.15.

L'évolution de la densité moyenne à l'aide de C_{exp} nécessite la détermination des volumes élémentaires. Le volume total du comprimé cylindrique est:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H = 2{,}864 \text{ cm}^3$$

où D est le diamètre et H est la hauteur du comprimé cylindrique. La densité expérimentale (ρ_{exp}^{cyl}) sera alors:

$$\rho_{exp}^{cyl} = \frac{m_{cyl}}{V} = 6{,}98 \text{ g/cm}^3$$

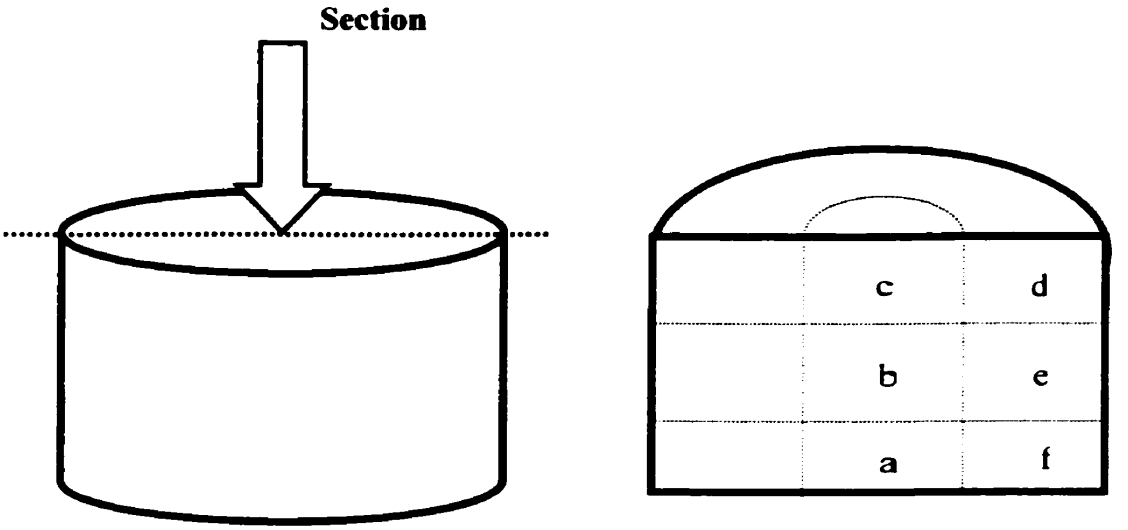


Figure 4.14 Section dans un comprimé cylindrique et distribution des zones d'intérêt pour le calcul du facteur de forme.

c : 2,23	d : 2,31
b : 2,29	e : 2,27
a : 2,12	f : 2,10

Figure 4.15 : Valeurs moyennes du facteur de forme mesurées sur une section médiane parallèle à l'axe de pressage du comprimé cylindrique.

Les volumes élémentaires de l'échantillon cylindrique seront:

$$v_x^{cylindre} = \frac{\pi d_{int}^2}{4} h = 0{,}105 \text{ cm}^3 \qquad v_x^{anneau} = \frac{\pi D^2}{4} h - v_x^{cylindre} = 0{,}850 \text{ cm}^3$$

où d_{int} = 0,63 cm est le diamètre et h = 0,34 cm est la hauteur du volume élémentaire cylindrique.

En utilisant les valeurs calculées plus haut et la relation (20), le calcul de la densité du comprimé cylindrique sera alors:

$$\rho_{calc}^{cyl} = \rho_{tassée} + \frac{C_{exp}}{V}\left[v_x^{cylindre}\left(\Delta\Phi_a + \Delta\Phi_b + \Delta\Phi_c\right) + v_x^{anneau}\left(\Delta\Phi_d + \Delta\Phi_e + \Delta\Phi_f\right)\right] \qquad (21)$$

Dans la relation (21) les variables ont eu les valeurs suivantes: $\rho_{tassée}$ = 3,48 g / cm^3 ; C_{exp} = 8,16 ; V = 2,864 cm^3 ; $v_x^{cylindre}$ = 0,105 cm^3 ; v_x^{anneau} = 0,850 cm^3 ; $\Delta\Phi_a = \Phi_a - \Phi_{tassé}$ = 2,12 – 1,78 = 0,34 ; $\Delta\Phi_b$ = 2,29 – 1,78 = 0,51 ; $\Delta\Phi_c$ = 2,23 – 1,78 =0,45 ; $\Delta\Phi_d$ = 2,31 – 1,78 = 0,53 ; $\Delta\Phi_e$ = 2,27 – 1,78 = 0,49 ; $\Delta\Phi_f$ = 2,10 – 1,78 = 0,32. Suite aux calculs, on obtient: ρ_{calc}^{cyl} = 7,11 g / cm^3.

Le fait que la densité expérimentale (ρ_{exp}^{cyl}) de l'échantillon cylindrique calculée en utilisant le rapport masse / volume et la densité calculée (ρ_{calc}^{cyl}) en utilisant les valeurs des facteurs de forme déterminées par analyse d'images ont des valeurs très proches (6,98 g/cm^3 et 7,11 g/cm^3), confirme que le modèle proposé décrit correctement la façon dont la poudre se densifie pendant le pressage.

Par ailleurs, des erreurs peuvent apparaître en utilisant cette méthode. Une première source des écarts dans la détermination de la densité, se trouve dans le fait qu'on a supposé une variation linéaire entre la densification des poudres et l'augmentation du facteur de forme pendant le pressage. Ce comportement peut être considéré valable pour certaines zones du domaine de densification, par contre, la densification n'est pas linéaire sur tout le domaine entre la valeur de densité initiale (tassée) de la poudre et celle maximale obtenue à la fin de pressage. En plus, la classe granulométrique de la poudre utilisée, la pression appliquée et la lubrification sont des autres facteurs qui influencent le calcul de la densité des poudres suite au pressage.

Une autre source des facteurs perturbateurs dans le calcul de densité d'un comprimé à vert présentant un gradient de densité dans son volume, est constitué par la façon dont on analyse l'ensemble des volumes élémentaires considérés à densité uniforme. Le fait que le nombre de volumes élémentaires ainsi que les formes et les dimensions peuvent varier selon notre choix, mène à des valeurs calculées de C_{exp} et de ρ_{calc} différentes. Il est bien entendu que les erreurs seront diminuées lorsque le nombre de volumes élémentaires dont la densité est considérée uniforme augmente. Finalement, en disposant d'un nombre suffisamment élevé des volumes élémentaires et en mesurant correctement les facteurs de forme sur la section du comprimé à vert, on peut envisager des résultats plus précis de densité du comprimé.

CONCLUSION

Dans cette étude, on a donné une image détaillée de l'évolution de la forme des particules de poudre de fer lors du pressage. En effet, on a caractérisé le comportement de trois classes granulométriques de poudre dans différentes conditions de pressage et de mode de lubrification.

La déformation des particules dans le volume du comprimé a été caractérisée et quantifiée à l'aide d'un facteur de forme. Les mesures du facteur de forme ont été réalisées dans neuf points d'une section transversale parallèle à l'axe de pressage du comprimé. Toutes ces mesures ont été réalisées et analysées à l'aide d'un logiciel d'analyse d'images. Il a été possible de relier la variation du facteur de forme des particules à l'augmentation de la densité locale à l'intérieur des comprimés.

Les mesures expérimentales ont mis en évidence une déformation non-uniforme des particules, correspondant à une distribution de densité dans le volume du comprimé. Le gradient de densité a été atténué lors du pressage en présence de stéarate de zinc utilisé

comme lubrifiant mélangé au poudre à une teneur de 1% poids. En l'absence de lubrifiant mélangé à la poudre, on a saisi des déformations importantes uniquement dans les zones à proximité des parois de la matrice métallique rigide et en spécial pour les grosses particules. Ces déformations des particules ont été influencées par le graphite déposé sur la surface des parois de la matrice pour que l'éjection des comprimés se réalise plus aisément.

En analysant les trois classes granulométriques de poudre à l'aide des facteurs de forme mesurés, on a constaté que la plus importante déformation a été subie par les particules de la plus grande classe granulométrique. La diminution des dimensions des particules a eu comme effet un plus important frottement entre les particules, donc leur déformation s'est produit plus difficilement.

Bien que la déformation dans l'ensemble de la poudre à distribution bi-modale soit plus difficile que celle de la classe granulométrique maximale, on ne peut pas se prononcer sur la déformation des particules individuelles qui appartiennent à cette classe de poudre. Il est en effet impossible de déterminer à quelle catégorie dimensionnelle appartiennent les sections des particules avec des surfaces mesurées égales. A ces restrictions de principe s'ajoutent les possibilités limitées d'analyse d'images métallographiques du programme "UTHSCA Image Tool" et la difficulté de préparation des échantillons pour l'observation métallographique.

Même dans ces conditions, on a réussi à mettre en évidence pour toutes les catégories de poudre analysées une variation du facteur de forme mesuré, similaire à celle indiquée dans la littérature pour la distribution de densité dans un comprimé de poudre métallique obtenu par pressage uniaxe, simple action, dans une matrice rigide. Ainsi, dans ces conditions de pressage, on a assisté à une diminution du facteur de forme dans la même direction que celle d'application de la pression à proximité des parois de la matrice. Également, à proximité du poinçon mobile, le facteur de forme a augmenté dans un plan perpendiculaire à la direction d'application de la pression de la région centrale de l'échantillon vers les extrémités. Dans les deux directions opposées (médiane dans le plan axial et inférieure dans le plan transversal), l'évolution du facteur de forme a été contraire.

En envisageant la dépendance de l'augmentation de densité locale d'un comprimé en fonction du facteur de forme mesuré, on a obtenu une relation permettant d'évaluer la densité moyenne du comprimé. Il est important de préciser que le facteur de proportionnalité entre la variation du facteur de forme local et l'augmentation de la densité est une fonction des conditions de pressage (poudre pressée, pression, lubrification) et ne dépend pas de la forme ou du volume du comprimé. La validité de cette relation théorique a été vérifiée en utilisant les résultats obtenus expérimentalement pour évaluer la densité à vert d'un comprimé de forme cylindrique.

BIBLIOGRAPHIE

[AKP 92]

E. Akpan, "Image Analysis Techniques for Characterizing Density, Defects, Inclusions and Grain Size in P/M Parts" Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1992, No. 1, pp. 235 - 248.

[ARB 84]

P. G. Arbstedt, "Les multiples propriétés et applications de la poudre de fer", Matériaux et Techniques - Métallurgie des poudres, no. 10 - 11, 1984, pp. 409 - 414.

[ARZ 82]

E. Arzt, "The Influence of an Increasing Particle Coordination on the Densification of Spherical Powders", Acta Metallurgica, 1982, vol. 30, pp. 1883 - 1890.

[BOC 66]

G. Bockstiegel, "The Porosity - Pressure Curve and its Relation to the Pore Size Distribution in Iron Powder Compacts", Modern Developments in Powder Metallurgy, vol. 1, H. H. Hausner (ed.), Plenum Press, New York, NY, 1966, pp. 155 - 187.

[BOC 95]

G. F. Bocchini, "Friction Effects in Metal Powder Compaction. Part One - Theoretical Aspects", Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials V1, 1995, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, pp. 2/115 - 2/140.

[CAR 84]

M. M. Carroll et K. T. Kim, "Pressure - Density Equations for Porous Metals and Metal Powders", Powder Metallurgy, 1984, vol. 27, pp. 153 - 159.

[CHA 68]

K. Kakar et A. C. D. Chaklander, "Deformation Theory of Hot - Pressing" (Density Equation for Hot - Pressing Conditions)", Journal Of Applied Phisics, 1968, vol. 39, pp. 2486 - 2488.

[DAV 97]

J. X. Liu et T. J. Davies, "Coordination number - density relationships for random packing of spherical powders", Powder Metallurgy, 1997, vol. 40, No. 1, pp. 48 - 50.

[DIX 71]

R.H.T. Dixon et A. Clayton, "Powder Metallurgy for Engineers", The Machinery Publishing Co. Ltd. 1971, pp. 51 - 53.

[DON 63]

J. Donachie et M. F. Burr, "Effects of Pressing on Metal Powders", Journal of Metals, 1963, vol. 15, pp. 849 - 854.

[FIS 78]

H. F. Fischmeister, E. Arzt et L. R. Olsson, "Paricle Deformation and Sliding During Compaction of Spherical Powders: A Study by Quantitative Metallography", Powder Metallurgy, 1978, vol 21, pp. 179 - 187.

[FIS 82]

H. F. Fischmeister, "Powder Compaction: Fundamentals and Recent Developments", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1982, vol 196, pp. 105 - 121.

[FIS 83]

H. F. Fischmeister et E. Arzt, "Densification of Powders by Particle Deformation", Powder Metallurgy, 1983, vol 26, No. 2, pp. 82 - 88.

[FON 95]

G. F. Bocchini, V. Fontanari et A. Molinari, "Friction Effects in Metal Powder Compaction. Part Two - Experimental Results", Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials V1, 1995, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, pp. 2/141 - 2/151.

[GAD 82]

S. Gâdea et al., "Manualul Inginerului Metalurg", Editura Tehnica Bucuresti, 1982, pp. 858 - 883.

[GAR 69]

J. S. Hirschhorn, M.W. Garey, "Plastic Deformation of Compacted Iron Powders", The International Journal of Powder Metallurgy, 1969, Vol. 5, no. 1, pp. 35 - 44,

[GAR 95]

T. Garino, M. Mahoney, M. Readey, K. Ewsuk, J. Gieske, G. Stoker et S. Min, "Characterization Techniques to Validate Models of Density Variations in Pressed Powder Compacts", International SAMPE Technical Conference, 1995, no. 27, pp. 610 - 621.

[GER 89]

R. M. German, "Particle Packing Characteristics", Materials Engineering Department, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1989, pp 121 - 130, 219 - 246, 391 - 409.

[GER 92]

R.M. German et M. Bulger, "A Model for Densification by Sintering of Bimodal Particle Size Distributions", The International Journal of Powder Metallurgy, 1992, Vol. 28, No. 3, pp. 301 - 308.

[GER 94]

R. M. German, "Powder Metallurgy Science", Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1994.

[GER 96]

R.M. German, "A Measure of the number of particles in agglomerates", The International Journal of Powder Metallurgy, 1996, Vol. 32, No. 4, pp. 365 - 373.

[GET 94]

D.T. Gethin, V.D. Tran, R.W. Lewis et A.K. Ariffin, "An investigation of Powder Compaction Processes", The International Journal of Powder Metallurgy, Vol. 30, No. 4, 1994, pp. 385 - 398.

[GOE 49]

C.G. Goetzel, "Treatise on Powder Metallurgy", volume 1, Interscience Publishers, New York, NY, 1949, pp. 259 - 312.

[GUI 95]

M. Guillot, H. Chtourou et S. Parent, "Local Density Measurements in Green and Sintered 316L Stainless Steel Powder Compacts", Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials V3, 1995, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, pp. 9/31 - 9/47.

[HAL 81]

G. W. Halldin, K. T. Yung et T. H. Tsai, "A New Analysis of Compressibility and Green Strength of Metal Powders", Progress in Powder Metallurgy, 1981, vol. 37, pp. 383 - 391.

[HAN 84]

Metals Handbook, American Society For Metals, 9^{e} édition, 1984, Volume 7, Powder Metallurgy.

[HAR 73]

J. S. Hardman et B. A. Lilley, "Mechanisms of Compaction of Powdered Materials", Proceedings of the Royal Society of London A, 1973, vol. A333, pp. 183 - 199.

[HEC 61]

R. H. Heckel, "An Analysis of Powder Compaction Phenomena", Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1961, vol. 221, pp. 671, 1001 - 1008.

[HEC 62]

R. W. Heckel, "A Normalised Density-Pressure Curve for Powder Compaction", Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1962, vol. 224, pp. 1073 - 1074.

[HEW 73]

R. L. Hewitt, W. Wallace et M. C. de Malherbe, "The Effects of Strain Hardenning in Powder Compaction", Powder Metallurgy, 1973, vol. 16, pp. 88 - 106.

[HEW 74]

R. L. Hewitt, W. Wallace et M. C. de Malherbe, "Plastic Deformation in Metal Powder Compaction", Powder Metallurgy, 1974, vol. 17, pp. 1 - 12.

[HIR 69]

J. S. Hirschorn, "Introduction to Powder Metallurgy", American Powder Metallurgy Institute, New York, N.Y., 1969.

[JAM 72]

P. J. James, "Fundamental aspects of the consolidation of powders", Powder Metallurgy International, 1972, vol. 4, pp. 82 - 85, 145 - 149, 193 - 198.

[JAM 77]

P. J. James, "Particle deformation during cold isostatic pressing of metal powders", Powder Metallurgy, 1977, vol. 20, pp. 199 - 204.

[JON 60]

W. D. Jones, "Fundamental Principles of Powder Metallurgy", Edward Arnold Publishers, London, UK, 1960, pp. 270 - 319.

[JON 86]

M.P. Jones, G.V. Blessing et C.R. Robbins, "Dry-Coupled Ultrasonic Elasticity Measurements of Sintered Ceramics and Their Green States", Materials Evaluation, 1986, No. 44, pp. 859 - 862.

[JUL 97]

Julien B, "Caractérisation de la déformation des particules de poudre dans un comprimé", Projet de fin d'études, École Polytechnique de Montréal, 1997.

[KAK 68]

K. Kakar et A. C. D. Chaklander, "Deformation Theory of Hot Pressing - Yield Criterion", Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1968, vol. 242, pp. 1117 - 1120.

[KAM 47]

R. Kamm, M. Steinberg et J. Wulff, "Plastic deformation in metal powder compacts" Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1947, vol 171, pp. 439 - 453.

[KAM 48]

R. Kamm, M. Steinberg et J. Wulff, "Lead - Grid Study of Metal Powder Compaction" Metals Technology, 1948, Technical Publication no. 2487, .

[KAM 87]

Kamal E. Amin, - "Friction in Metal Powder", The International Journal or Powder Metallurgy, 1987, vol. 23, no. 2, pp. 83 - 93.

[KIM 93]

K.T. Kim et Y.H. Cho, "Hot upsetting of porous alloy steel preforms", Powder Metallurgy, 1993, Vol. 36, No. 2, pp. 129 - 134.

[KOS 68]

M. C. Kostelnik, F. H. Kludt et J. K. Beddow, "The Initial Stage of Compaction of Metal Powders in a Die", International Journal of Powder Metallurgy, 1968, vol. 4, no. 4, pp. 19 - 27.

[KUC 56]

G. C. Kuczynski et I. Zaplatynskyj, "Density Distribution in Metal Powder Compacts", Journal of Metals, 1956, Vol. 8 (février), pp. 215 - 216,

[KUM 87]

J. V. Kumar, "Physics of Powder Consolidation", Report MDN R&D 10 1987, Mishra Dhatu Nigam Limited, Hyderabad, India, 1987.

[KUN 92]

J. Kunesch, W.A. Kaisser et G. Petzow, "Pressing and Sintering Defects in Powder Mixtures", Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1992, No. 1, pp. 245 - 258.

[LAN 97]

J.J. Lannutti, "Characterization and Control of Compact Microstructure", MRS Bulletin, december 1997, pp. 38 - 44.

[LAW 82]

A. Lawley, "Powder Consolidation", Advances in Powder Technology, G. Y. Chin (ed.), American Society for Metals, Metals Park, OH, 1982, pp. 75 - 97.

[LEN 80]

F. V. Lenel, "Powder Metallurgy, Principles and Applications", Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1980, pp. 99 - 116.

[LI 94]

Shujie Li, P.B. Khosrovabadi et B.H. Kolster, "New compaction Equation for powder materials", The International Journal of Powder Metallurgy, 1994, Vol. 30, no. 1, pp. 47 - 57,

[LIU 97]

J. X. Liu et T. J. Davies, "Packing state and compaction equation of monosize spherical powders", Powder Metallurgy, 1997, vol. 40, No. 1, pp. 51 - 54.

[MAC 77]

H.M. MacLeod et K. Marshall, "The determination of density distributions in ceramic compacts using autoradiography" Powder Technology, 1977, No. 16, pp. 107 - 122.

[MOO 85]

I. H. Moon et J. S. Choi, "Dependence of Green Strength on Contact Area Between Powder Particles for Spherical Copper Powder Compacts", Powder Metallurgy, 1985, vol. 28, pp. 21 - 26.

[MPIF 01-95]

MPIF Standard 01, "Method for Sampling Finished Lots of Metal Powders", Metal Powder Industries Federation, 1995.

[MPIF 03-85]

MPIF Standard 03, "Method for Determination of Flow Rate of Free-Flowing Metal Powders Using The Hall Apparatus", Metal Powder Industries Federation, 1985.

[MPIF 04-92]

MPIF Standard 04, "Method for Determination of Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders Using The Hall Apparatus", Metal Powder Industries Federation, 1992.

[MPIF 05-92]

MPIF Standard 05, "Method for Determination of Sieve Analysis of Metal Powders", Metal Powder Industries Federation, 1992.

[MPIF 09-94]

MPIF Standard 09, "Terms Used in Powder Metallurgy", Metal Powder Industries Federation, 1994.

[MPIF 46-92]

MPIF Standard 46, "Determination of Tap Density of Metal Powders", Metal Powder Industries Federation, 1992.

[MPIF 53-92]

MPIF Standard 53, "Method for Measuring the Volume of the Apparent Density Cup Used in the Hall or Carney Apparatus (Standards 04 and 28)", Metal Powder Industries Federation, 1992.

[PET 86]

W. Petruk, "Analyse d'images: un aperçu des réalisations", Rapport de CANMET 1986, No. 86-04F

[RAK 35]

V.S.Rakovski, "Fundamental Considerations in the Production of Hard Alloys", Onti, Moscow-Leningrad, 1935.

[ROB 88]

R.A. Roberts "A Dry-Contact Coupling Technique for Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Green-State Ceramics", Materials Evaluation, 1988, No. 46, pp. 758 - 765.

[RUS 90]

J.C. Russ, "Computer - Assisted Microscopy, The Measurement and Analysis of Images", Plenum Press, 1990, New York, N.Y., pp 1 - 12, 309 - 416.

[SEE 46]

R. P. Seeling, J. Wulff, "The pressing operation in the fabrication of articles by powder metallurgy", Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1946, vol. 166, pp. 492 - 500.

[SHE 80]

T. Sheppard et H. B. McShane, "Strength of cold - pressed compacts", Powder Metallurgy", 1980, no. 3, pp. 120 - 125.

[STR 86]

S.D.Strothers et K. Vedula, "Green strength of the interface in multilayered compacts", The International Journal of Powder Metallurgy, 1986, Vol. 22, no. 4, pp. 227 - 232,

[SUN 73]

B. O. Sundstrom et H. F. Fischmeister, "A Continuum Mechanical Model for Hot and Cold Compaction ", Powder Metallurgy International, 1973, vol. 5, pp. 171 - 174.

[SUR 84]

T. Surdeanu et M. Pernes, "Piese Sinterizate din Pulberi Metalice", Editura Tehnica, Bucuresti, 1984, pp. 28 - 45, 305 - 313.

[TUR 97]

S. Turenne, "Matériaux Métalliques et Céramiques", École Polytechnique de Montréal, 1997, pp. 149 – 171.

[TUR 98]

S. Turenne, "Procédés de la Métallurgie des Poudres", Département de métallurgie et de génie des matériaux, 1998.

[WRI 95]

W.M.D. Wright, D.A.Hutchins et M.H. Lewis, "Ultrasonic imaging of silicon nitride ceramic before and after firing" Journal of Materials Science Letters, 1995, Vol. 14, No. 5, pp. 366 – 369, 1995,

[YAM 89]

K. Yamanaka, C.K. Jen, C. Neron et J.F. Bussière, "Improved Ultrasonic Evaluation of Green-State Ceramics with the Use of a Surface-Bonded Adhesive Tape", Materials Evaluation, 1989, No. 47, pp. 828 – 834.

ANNEXES

Annexe 1. Résultats du tamisage de la poudre de Fe ATOMET

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	97,544	2,468	4,919	18,296	26,365	25,499	19,613	97,161	0.39
2.	103,823	3,348	6,855	21,628	26,508	25,808	19,503	103,65	0.16
3.	115,042	3,692	7,098	25,667	32,041	22,242	23,731	114,471	0.49
4.	113,196	3,809	7,731	27,894	27,322	25,207	21,16	113,123	0.06
5.	119,065	3,64	7,44	25,93	24,285	31,485	26,276	119,056	0.008
6.	114,138	3,314	6,826	22	23,184	31,82	26,88	114,024	0.1
7.	119,415	3,515	7,81	27,155	27,23	31,03	22,6	119,34	0.06
8.	121,193	3,632	7,882	27,62	29,307	31,807	20,85	121,098	0.08
9.	100,24	3,226	6,213	21,306	29,706	20,712	19,16	100,323	0.02
10.	112,387	3,429	7,065	25,691	29,898	25,78	20,45	112,313	0.06
11.	117,725	3,919	8,379	25,085	27,865	30,61	21,871	117,657	0.06
12.	116,085	5,23	10,235	29,967	29,861	24,946	15,764	116,003	0.07
13.	116,125	4,878	9,32	26,36	28,021	28,57	18,97	116,119	0.006
14.	112,415	3,936	5,982	24,932	25,663	29,577	22,367	112,357	0.05
15.	116,256	4,659	9,16	26,528	28,953	27,269	19,678	116,247	0.008
16.	120,464	4,278	8,652	25,304	28,876	31,73	21,618	120,458	0.005
17.	119,317	4,342	8,82	26,47	27,211	31,148	21,32	119,311	0.005
18.	126,576	4,601	9,545	28,459	27,725	33,4	22,794	126,523	0.04
19.	120,583	4,195	9,275	27,44	25,842	31,162	22,63	120,544	0.03
20.	117,01	4,6	9,335	26,005	25,95	29,205	21,86	116,955	0.05

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
21.	125,104	4,301	9,285	27,09	28,67	31.13	24,6	125,076	0.02
22.	123,035	4,22	8,127	26,585	26,61	32,412	24,881	122,835	0.16
23.	113,245	3,835	8,221	23,649	25,136	29,576	22,791	113,208	0.03
24.	119,804	4,025	8,144	27,391	27,116	30,84	22,283	119,799	0.004
25.	121,873	4,007	7,61	27,53	27,23	31,483	24,007	121,867	0.005
26.	117,24	4,754	8,895	24,853	26,149	30,738	21,746	117,135	0.09
27.	117,521	5,081	10,349	26,68	27,541	28,126	19,74	117,517	0.004
28.	121,57	4,59	8,585	27,052	25,975	31,725	23,622	121,549	0.02
29.	120,219	4,755	8,855	25,965	29,435	27,375	23,826	120,211	0.007
30.	119,07	4,44	7,325	25,95	26,031	31,205	24,086	119,037	0.03
31.	120,42	4,5	9,071	26,271	27,315	31,235	22	120,392	0.02
32.	122,24	5,07	9,155	27,241	32,472	29,065	19,231	122,233	0.006
33.	117,842	4,61	8,453	26,181	29,195	28,336	21,054	117,829	0.01
34.	114,111	4,24	8,32	25,69	24,3	29,25	22,28	114,08	0.03
35.	117,19	4,92	8,76	26,31	26,43	28,92	21,84	117,18	0.009
36.	117,56	4,56	8,48	25,78	29,45	27,58	21,65	117,5	0.05
37.	120,38	4,89	9,08	26,83	26,12	30,77	22,65	120,34	0.03
38.	124,38	5,059	9,138	27,529	25,598	31,209	25,79	124,323	0.05
39.	116,617	5,107	9,1	26,856	26,115	27,681	21,692	116,551	0.06
40.	120,127	4,007	8,904	28,47	25,297	29,267	24,086	120,031	0.08

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
41.	116,866	4,392	9,166	27,266	28,12	26,184	21,679	116,807	0.05
42.	117,056	4,318	8,597	25,163	28,562	28,58	21,696	116,996	0.05
43.	122,514	4,963	9,37	26,997	26,44	30,865	23,747	122,382	0.1
44.	120,794	5,57	9,915	29,602	27,157	27,931	20,558	120,733	0.05
45.	122,927	5,551	9,23	28,68	27,818	29,785	21,783	122,847	0.06
46.	119,6	4,619	8,99	28,498	27,959	27,349	22,08	119,495	0.09
47.	120,93	5,4	9,852	29,301	30,045	26,663	19,6	120,861	0.06
48.	107,72	4,294	7,495	24,924	24,254	26,987	19,72	107,674	0.04
49.	122,58	4,812	9,652	27,376	26,659	31,109	22,865	122,473	0.09
50.	122,484	5,404	9,924	28,969	26,3	29,525	22,26	122,382	0.08
51.	114,617	5,089	9,22	27,492	24,392	27,87	20,466	114,529	0.08
52.	117,712	3,898	8,131	28,853	25,695	28,691	22,319	117,587	0.1
53.	114,29	5,264	8,37	26,184	27,167	26,342	21,921	114,248	0.04
54.	116,246	4,656	8,157	28,46	28,037	27,206	19,665	116,181	0.06
55.	114,841	4,173	7,44	27,36	25,81	28,54	21,49	114,813	0.02
56.	115,866	4,855	9,757	28,631	29,781	24,401	18,33	115,755	0.09
57.	111,738	4,897	8,758	30,079	25,041	25,333	17,56	111,668	0.06
58.	117,97	5,718	10,42	30,66	27,64	25,935	17,56	117,933	0.03
59.	108,417	4,555	8,985	27,305	24,37	25,515	17,62	108,35	0.06
60.	124,65	5,75	10,365	29,115	26,53	31,045	21,77	124,575	0.06

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
61.	122,482	5,53	9,88	29,53	27,74	28,5	21,22	122,4	0.07
62.	122,196	4,79	8,685	27,895	27,015	30,045	23,695	122,095	0.08
63.	104,08	4,145	7,415	24,505	22,75	26,05	19,165	104,03	0.05
64.	106,075	4,27	9,1	26,04	23,74	25,65	17,25	106,05	0.02
65.	127,172	4,845	9,43	30,19	28,635	29,875	24,115	127,09	0.06
66.	117,656	5,235	10,31	28,43	27,13	27,73	18,75	117,585	0.06
67.	115,154	4,985	8,355	25,975	25,875	27,955	21,895	115,04	0.1
68.	110,068	4,33	8,08	28,33	27,45	23,32	18,5	110,01	0.05
69.	115,965	5,465	10,135	30,845	29,38	23,4	16,655	115,88	0.07
70.	102,09	4,28	8,925	23,15	22,835	24,78	18,06	102,03	0.06
71.	112,286	5,32	9,665	27,975	24,505	26,115	18,7	112,28	0.005
72.	108,345	4,15	8,825	23,37	24,475	26,837	20,665	108,322	0.02
73.	109,991	4,92	9,015	26,09	22,45	28,05	19,45	109,975	0.01
74.	106,11	4,42	8,808	25,295	23,69	26,165	17,695	106,073	0.03
75.	111,135	4,97	10,005	27,395	25,615	24,495	18,585	111,065	0.06
76.	119,618	4,725	9,99	27,255	25,71	29,7	22,169	119,549	0.06
77.	109,535	4,615	9,515	25,135	24,99	26,371	18,893	109,519	0.02
78.	110,439	5,75	9,635	26,16	25,59	24,65	18,558	110,343	0.09
79.	109,58	5,135	8,995	26,815	26,2	23,5	18,93	109,575	0.005
80.	118,089	6,055	10,355	29,85	26,125	26,668	18,94	117,993	0.08

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
81.	115,403	4,93	9,698	27,71	24,305	27,45	21,21	115,303	0.09
82.	108,665	5,705	10,695	27,265	22,495	24,695	17,735	108,59	0.07
83.	108,25	4,865	9,248	25,115	24,69	25,465	18,84	108,223	0.02
84.	116,525	5,239	9,075	28,605	29,338	25,243	18,94	116,44	0.07
85.	111,162	5,655	9,725	28,88	25,76	22,835	18,2	111,055	0.1
86.	109,655	5,575	9,115	28,59	21,74	24,95	19,585	109,555	0.09
87.	113,285	4,75	8,1	25,6	24,78	27,71	22,285	113,225	0.05
88.	106,865	5,47	9,47	26,125	21,315	25,545	18,865	106,79	0.07
89.	108,899	5,62	9,355	27,135	21,45	26,025	19,29	108,875	0.02
90.	105,44	4,515	8,155	26,17	20,705	26,115	19,71	105,37	0.07
91.	116,16	5,918	9,78	29,659	23,95	26,35	20,41	116,067	0.08
92.	111,903	4,67	7,68	28,755	19,735	27,895	23,1	111,835	0.06
93.	103,969	4,81	8,125	27,6	20,19	24,715	18,45	103,89	0.08
94.	104,26	4,465	9,13	24,89	23,21	25,345	17,139	104,179	0.08
95.	109,648	4,289	8,625	23,395	25,21	26,215	21,828	109,562	0.08
96.	112,635	5,45	9,125	25,115	22,66	28,309	21,96	112,619	0.01
97.	109,468	4,955	9,51	28,48	27,2	21,83	17,425	109,4	0.06
98.	115,399	5	8,36	26,1	23,415	29,265	23,175	115,315	0.07
99.	103,625	5,12	8,71	25,089	20,455	24,69	19,53	103,594	0.03
100.	110,308	4,81	7,82	26,45	27,09	23,975	20,075	110,22	0.08

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
101.	112,106	4,905	8,487	25,83	22,42	28,164	22,28	112,086	0.02
102.	112,875	5,461	9.21	28,07	23,62	26,79	19,68	112,831	0.04
103.	115,93	4,225	7,47	25,335	30,98	27,34	20,49	115,84	0.08
104.	106,563	4,81	8,6	25,57	24,07	25,62	17,88	106,55	0.01
105.	108,921	4,715	8,32	24,335	24,48	27,46	19,525	108,835	0.08
106.	108,987	4,12	7,04	24,685	29,905	25,45	17,71	108,91	0.07
107.	102,486	4,24	8,725	24,415	24,765	24,015	16,245	102,405	0.08
108.	105,753	4,025	7,63	25,57	24,889	25,37	18,21	105,694	0.06
109.	112,056	3,8	8,11	25,01	25,84	28,1	21,1	111,96	0.08
110.	105,574	4,25	9,04	26,65	25,3	24,525	15,725	105,49	0.08
111.	112,021	4,05	8,67	25,88	26,185	27,35	19,88	112,015	0.005
112.	114,18	3,93	7,99	25,74	27,475	27,31	21,72	114,165	0.01
113.	112,331	3,529	7,56	23,58	29,04	26,545	22	112,254	0.07
114.	106,037	4,58	8,98	25,78	23,74	24,51	18,35	105,97	0.06
115.	106,646	4,235	8,35	25,73	23,66	26,505	18,08	106,56	0.08
116.	114,98	4,49	8,66	25,81	25,125	28,875	21,93	114,89	0.08
117.	108,551	3,425	7,155	24,445	25,325	28,455	19,7	108,505	0.04
118.	112,871	4,325	7,5	25,935	23,995	29,39	21,63	112,775	0.085
119.	110,567	4,77	8,8	26,535	24,07	27,61	18,735	110,52	0.04
120.	113,826	4,08	8,235	25,46	24,15	30,235	21,62	113,78	0.04

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
121.	106,064	4,025	8,13	24,505	24,11	26,74	18,49	106	0.06
122.	110,321	4,67	8,345	25,1	24,12	28,39	19,62	110,245	0.07
123.	108,642	4,55	7,96	25,05	23,255	28,285	19,47	108,57	0.07
124.	110,656	4,48	8,6	24,49	24,625	28,26	20,13	110,585	0.06
125.	110,767	4,27	8,185	23,925	24,91	28,495	20,92	110,705	0.06
126.	108,376	3,965	7,235	23,145	22,31	29,245	22,385	108,285	0.08
127.	106,8	3,92	7,01	23,59	22,95	28,34	20,91	106,72	0.07
128.	104,829	4,73	8,4	25,53	21,66	26,4	18,01	104,73	0.09
129.	109,159	4,54	8,21	24,68	22,78	29,03	19,87	109,11	0.04
130.	110,6	5,32	9,36	26	23,988	26,37	19,49	110,528	0.07
131.	109,745	4,715	8,12	24,915	23,02	28,63	20,32	109,72	0.02
132.	109,936	3,43	6,44	22,64	22,8	30,89	23,68	109,88	0.05
133.	108,51	3,9	6,86	22,24	22,64	29,55	23,29	108,48	0.03
134.	109,157	4,36	7,59	24,67	21,98	29,43	21,08	109,11	0.04
135.	109,566	4,125	7,38	23,635	23,065	29,09	22,215	109,51	0.05
136.	108,053	4,7	9,015	24,385	23,6	27,134	19,14	107,975	0.07
137.	110,125	3,89	7,64	25,86	25,2	26,585	20,865	110,04	0.08
138.	110,835	3,7	7,395	24,72	24,66	27,285	23,05	110,81	0.02
139.	113,635	3,245	7,04	21,775	25,94	31,415	24,18	113,595	0.04
140.	109,217	3,565	7,195	24,05	25,01	27,075	22,25	109,145	0.07

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
141.	107,887	3,37	7,075	21,88	24,06	28,928	22,51	107,823	0.06
142.	110,92	3,8	7,941	23,705	24,273	28,74	22,422	110,881	0.04
143.	108,595	3,098	6,708	22,964	24,1	27,62	24,02	108,51	0.08
144.	112,472	3,97	8,435	25,63	26,53	26,095	21,725	112,385	0.08
145.	108,663	4,502	8,835	24,46	24,412	26,39	19,985	108,584	0.07
146.	110,06	4,46	8,16	24,395	24,762	27,22	20,982	109,979	0.07
147.	109,24	4,26	8,68	23,605	24,355	26,868	21,41	109,178	0.06
148.	109,544	5,065	9,855	26,731	25,838	24,571	17,413	109,473	0.06
149.	110,251	4,605	9,4	25,992	25,43	25,305	19,468	110,2	0.05
150.	110,365	4,47	9,212	25,962	24,9	25,585	20,202	110,331	0.03
151.	110,858	5,06	9,316	25,438	24,416	27,372	19,185	110,787	0.06
152.	110,47	4,262	8,375	23,815	24,33	27,595	22,015	110,392	0.07
153.	109,766	3,905	7,638	23,1	24,213	29,784	21,05	109,69	0.07
154.	113,034	4,152	8,388	23,916	24,815	30,115	21,591	112,977	0.05
155.	110,62	4,526	8,56	24,972	24,773	28,012	19,682	110,525	0.08
156.	111,142	4,489	8,521	24,144	25,738	28,052	20,122	111,066	0.07
157.	111,207	4,615	9,111	24,901	24,154	27,505	20,862	111,148	0.05
158.	111,988	3,651	7,459	23,883	24,852	29,071	22,998	111,914	0.07
159.	111,004	4,077	7,886	23,321	23,886	29,664	22,148	110,982	0.02
160.	113,022	4,725	8,522	24,988	26,757	27,885	20,13	113,007	0.01

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
161.	108,574	4,988	8,746	24,705	22,66	27,275	20,187	108,561	0.01
162.	110,111	4,807	8,707	24,642	24,16	27,443	20,34	110,099	0.01
163.	110,92	5,49	9,438	25,942	25,052	25,283	19,615	110,82	0.09
164.	111,475	4,733	7,724	24,788	24,131	27,971	22,045	111,392	0.07
165.	111,632	4,449	8,538	24,027	25,711	27,826	21,065	111,616	0.01
166.	110,331	4,548	8,366	24,021	24,407	27,531	21,375	110,248	0.08
167.	109,893	5,287	8,46	25,361	23,34	26,836	20,597	109,881	0.01
168.	111,077	4,863	8,32	25,095	22,607	28,855	21,303	111,043	0.03
169.	110,632	4,095	7,674	24,436	24,291	28,8	21,328	110,624	0.007
170.	110,272	5,14	8,547	25,392	24,25	27	19,94	110,269	0.003
171.	110,848	5,931	9,213	26,311	22,906	27,22	19,259	110,84	0.007
172.	110,909	4,551	7,391	24,873	24,609	28,41	21,025	110,859	0.05
173.	109,966	4,381	7,478	24,428	24,995	26,926	21,658	109,866	0.09
174.	110,627	3,624	6,584	22,793	24,95	28,453	24,136	110,54	0.08
175.	109,758	4,834	7,81	25,531	23,999	27,361	20,168	109,703	0.05
176.	110,03	4,531	7,306	23,998	23,865	27,761	22,468	109,929	0.09
177.	110,641	3,205	5,13	20,698	22,309	31,169	28,055	110,566	0.07
178.	111,505	3,896	6,743	22,952	23,93	29,645	24,229	111,395	0.098
179.	111,7	4,821	7,652	25,073	24,475	28,315	21,171	111,607	0.08
180.	110,732	3,938	6,586	22,3	22,7	30,66	24,503	110,687	0.04

No.	Q initial [g]	T 1 > 180 µm [g]	T 2 > 150 µm [g]	T 3 > 106 µm [g]	T 4 > 75 µm [g]	T 5 > 45 µm [g]	T 6 < 45 µm [g]	ΣQ_i [g]	Erreur %
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
181.	110,785	4,315	7,309	23,872	22,854	29,731	22,68	110,761	0.02
182.	110,955	4,891	8,209	24,251	24,135	28,189	21,198	110,873	0.07
183.	111,655	4,511	7,198	23,088	23,365	29,37	24,074	111,606	0.04
184.	111,84	4,183	8,3	23,575	24,24	28,79	22,72	111,808	0.03
185.	110,981	4,924	8,758	23,886	23,875	28,348	21,144	110,935	0.04
186.	110,924	4,454	7,281	23,169	22,212	29,975	23,773	110,864	0.05
187.	112,265	4,072	7,088	22,908	22,887	30,44	24,825	112,22	0.04
188.	109,561	4,09	6,915	23,567	21,6	30,08	23,256	109,508	0.05
189.	111,195	4,716	8,036	24,9	23,38	28,665	21,421	111,118	0.07
190.	110,88	4,518	7,68	23,86	23	29,641	22,111	110,81	0.06
191.	110,393	4,693	8,303	24,983	24,52	27,306	20,544	110,349	0.04
192.	111,649	5,849	9,781	27,049	23,485	27,095	18,335	111,594	0.05
193.	110,614	6,906	11,226	29,61	24,525	24,635	13,662	110,564	0.05
194.	110,715	4,444	7,448	24,806	23,055	30,144	20,722	110,619	0.09
195.	109,379	3,809	6,766	22,515	23,92	30,105	22,198	109,313	0.06
196.	110,424	4,468	7,285	24,01	23,23	28,136	23,195	110,324	0.09
197.	111,922	5,664	8,63	26,933	23,113	27,52	19,987	111,847	0.07
198.	111,544	5,669	9,044	27,021	23,632	27,422	18,655	111,443	0.09
199.	110,94	4,062	7,994	24,097	24,514	27,828	22,352	110,847	0.08
200.	98,168	6,01	9,61	23,878	20,62	22,215	15,789	98,122	0.05

Annexe 2: Calcul des valeurs moyennes du facteur de forme pour la poudre de classe 1 tassée.

Tableau A.2.1.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 1 de poudre de classe 1 tassée.

Objet 1.d50.1	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	216,19	21,78	12,84	**1,81**	#40	481	27,8	24,21	1,15
Ecart	149,36	7,5	5,34	0,52	#41	55	9,85	5,39	1,83
#1	214	20,81	15,81	1,32	#42	208	25,06	12,53	2
#2	87	16,49	6,32	2,61	#43	577	33,6	22,2	1,51
#3	86	18,44	6,08	3,03	#44	175	19,42	18,44	1,05
#4	139	21,93	9,9	2,22	#45	286	29,43	14,14	2,08
#5	78	16,12	10,05	1,6	#46	381	27,29	17,89	1,53
#6	101	17,12	11,05	1,55	#47	301	25,24	15,81	1,6
#7	163	19,72	10,3	1,92	#48	100	18,79	7,62	2,47
#8	238	32,89	10,77	3,05	#49	640	38,63	21,54	1,79
#9	104	14,42	8,6	1,68	#50	122	17,49	10,3	1,7
#10	576	33,96	22,56	1,51	#51	395	26,68	21,59	1,24
#11	295	26,17	15,13	1,73	#52	271	29,73	18,97	1,57
#12	86	16,97	8,49	2	#53	277	26,48	13,15	2,01
#13	59	14,14	5,66	2,5	#54	203	20,4	12,17	1,68
#14	138	19,72	10,3	1,92	#55	367	27,59	21,93	1,26
#15	151	18,25	13,15	1,39	#56	76	12,21	9,43	1,29
#16	190	23,41	12,65	1,85	#57	562	33,3	19,85	1,68
#17	336	22,36	19,24	1,16	#58	341	32,7	18,38	1,78
#18	88	15,81	6,32	2,5	#59	283	34,06	10	3,41
#19	72	12,21	10,82	1,13	#60	96	16,28	9,22	1,77
#20	52	13,45	5,66	2,38	#61	427	26,68	20,62	1,29
#21	78	15	7	2,14	#62	245	26,31	16,12	1,63
#22	170	26,48	9,22	2,87	#63	498	36,24	23,43	1,55
#23	376	32,56	17,26	1,89	#64	206	23,54	11,18	2,11
#24	176	20,22	13,15	1,54	#65	244	26,25	15,81	1,66
#25	53	12,21	5	2,44	#66	106	20,12	10,3	1,95
#26	168	19,1	11,05	1,73	#67	248	30,07	13,04	2,31
#27	63	10,44	8,25	1,27	#68	232	31,95	16,16	1,98
#28	451	35,81	17,2	2,08	#69	333	21,02	19,7	1,07
#29	144	18,25	9,06	2,02	#70	50	9,06	7,07	1,28
#30	472	26,93	21,84	1,23	#71	53	11,18	5,1	2,19
#31	121	16,03	11,05	1,45	#72	291	23,6	13,6	1,74
#32	149	19,03	12,04	1,58	#73	66	11,05	8,06	1,37
#33	370	26,4	22,8	1,16	#74	64	14,87	5,39	2,76
#34	111	15	10	1,5	#75	346	34,83	14,21	2,45
#35	188	19,65	13,34	1,47	#76	51	9,49	7,28	1,3
#36	121	18,03	11,05	1,63	#77	102	14,32	9,22	1,55
#37	150	17,03	12,04	1,41	#78	75	16,49	6,32	2,61
#38	177	17,26	12,17	1,42	#79	62	13,34	5,1	2,62
#39	392	28,02	19,42	1,44					

Tableau A.2.2.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 2 de poudre de classe 1 tassée.

Objet 1.d50.2	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	274,79	24,09	14,09	1,8	#39	57	10,82	7,21	1,5
Ecart	274,72	13,5	7,41	0,48	#40	144	22,36	9,22	2,43
#1	433	29,53	22,83	1,29	#41	53	13,93	4,47	3,11
#2	396	38,95	16,28	2,39	#42	146	19,7	11,18	1,76
#3	132	14,76	10,3	1,43	#43	545	36,62	23,02	1,59
#4	1195	60,01	32,02	1,87	#44	342	24,19	23,19	1,04
#5	277	23,19	20,22	1,15	#45	568	36,06	23,85	1,51
#6	117	18,11	11,05	1,64	#46	125	14,56	10,44	1,39
#7	444	30,41	21,93	1,39	#47	79	15	7,81	1,92
#8	57	13,04	5,83	2,24	#48	50	10,3	5	2,06
#9	208	19,31	16,16	1,2	#49	1350	75,54	38,33	1,97
#10	59	13,15	8,06	1,63	#50	117	16,55	9,85	1,68
#11	109	20,12	9,85	2,04	#51	254	21,4	16,4	1,3
#12	82	12,21	8,6	1,42	#52	57	11,05	6,08	1,82
#13	626	32,39	27,29	1,19	#53	69	14,32	7,28	1,97
#14	459	35,38	21,93	1,61	#54	149	21,54	8,54	2,52
#15	71	11,4	6,32	1,8	#55	210	26,93	11,66	2,31
#16	218	21,47	15,65	1,37	#56	224	28,64	12,08	2,37
#17	717	43,17	26,68	1,62	#57	206	26,93	10,77	2,5
#18	327	27,2	15,81	1,72	#58	1140	80,99	28,79	2,81
#19	758	50,93	19,1	2,67	#59	424	34,71	16,28	2,13
#20	148	21,19	9,49	2,23	#60	1038	52,7	26,63	1,98
#21	261	24,17	14,32	1,69	#61	303	24,52	16,28	1,51
#22	227	24,52	11,18	2,19	#62	317	24,04	18,97	1,27
#23	95	17,49	7,21	2,43	#63	49	12,08	4,47	2,7
#24	59	11,18	7,62	1,47	#64	190	22,2	13,15	1,69
#25	212	26,17	14,14	1,85	#65	81	12,08	8,94	1,35
#26	64	12,37	7,28	1,7	#66	95	18,38	11,31	1,62
#27	468	27,29	22,83	1,2	#67	358	26,63	17,2	1,55
#28	590	33,02	25,02	1,32	#68	278	31,38	16,12	1,95
#29	58	10,82	5,83	1,86	#69	193	20,25	14,87	1,36
#30	227	27,07	13,04	2,08	#70	142	18,03	10,05	1,79
#31	52	11,31	8,49	1,33	#71	60	13,34	5,1	2,62
#32	56	12,08	5,39	2,24	#72	448	31,02	24,7	1,26
#33	317	26,91	16,28	1,65	#73	422	28,44	23,35	1,22
#34	380	24,41	19,42	1,26	#74	177	20,62	12,37	1,67
#35	66	18,68	6,32	2,95	#75	56	11,7	5,39	2,17
#36	204	17,46	16,49	1,06	#76	226	20,62	14,21	1,45
#37	90	16,28	8,25	1,97	#77	91	17,09	7,28	2,35
#38	67	10,82	8,6	1,26					

Tableau A.2.3.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 3 de poudre de classe 1 tassée.

Objet 1.d50.3	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	308,31	25,52	15,39	1,73	#45	148	17,49	11,66	1,5
Ecart	277,19	13,6	8,09	0,48	#46	872	44,38	35,17	1,26
#1	71	13	6,71	1,94	#47	426	31,78	16,49	1,93
#2	884	53,94	21,38	2,52	#48	90	14,56	9,22	1,58
#3	58	10,63	5	2,13	#49	267	21,63	17,2	1,26
#4	976	61,62	24,84	2,48	#50	258	25,06	11,66	2,15
#5	273	23,26	15,23	1,53	#51	94	13,04	9,43	1,38
#6	322	28,46	18,97	1,5	#52	433	29,15	25,18	1,16
#7	145	17,26	9,22	1,87	#53	125	14,87	14,14	1,05
#8	282	25,5	17,26	1,48	#54	406	28,65	20,59	1,39
#9	156	22,47	10,77	2,09	#55	106	16,12	9,43	1,71
#10	63	13,93	7,62	1,83	#56	70	15,13	7,07	2,14
#11	362	23,26	21,02	1,11	#57	81	12,53	8,94	1,4
#12	77	14,32	6,71	2,13	#58	404	33,14	19,1	1,73
#13	65	12,17	6,08	2	#59	66	10,63	7,81	1,36
#14	225	19,1	15,13	1,26	#60	594	38,95	22,83	1,71
#15	187	17,2	15	1,15	#61	195	22,2	15,81	1,4
#16	55	11,4	5,1	2,24	#62	131	19,24	13,15	1,46
#17	80	13	8,54	1,52	#63	230	36,06	18,03	2
#18	125	15,81	10,82	1,46	#64	401	36,35	14,14	2,57
#19	187	22,8	11,4	2	#65	82	17,09	6,32	2,7
#20	994	46,75	32,56	1,44	#66	124	12,81	11,4	1,12
#21	176	21,59	11,4	1,89	#67	1101	46,87	30,59	1,53
#22	672	33,6	23,6	1,42	#68	135	16,16	15,23	1,06
#23	622	33,96	26,68	1,27	#69	83	12,37	7,28	1,7
#24	429	32,28	18,68	1,73	#70	222	19,42	14,32	1,36
#25	513	30	25	1,2	#71	323	32,89	18,03	1,82
#26	143	15	12,21	1,23	#72	171	19,24	14,14	1,36
#27	49	10,44	6,32	1,65	#73	142	23,35	8,49	2,75
#28	267	23,35	16,28	1,43	#74	129	14,32	11,18	1,28
#29	53	8,49	7,07	1,2	#75	388	30,23	19,42	1,56
#30	129	19,24	7,07	2,72	#76	94	13,34	11,4	1,17
#31	281	28,16	16,76	1,68	#77	586	41,59	18,25	2,28
#32	511	46,62	19,42	2,4	#78	251	25,46	13,45	1,89
#33	988	72,07	36,72	1,96	#79	867	50,8	35	1,45
#34	483	36,06	25,24	1,43	#80	115	13	12,08	1,08
#35	152	22,09	10,05	2,2	#81	1227	75,43	30,15	2,5
#36	80	12,08	8,94	1,35	#82	60	10,82	5,83	1,86
#37	325	32,02	12,81	2,5	#83	68	13,15	6,08	2,16
#38	200	23,09	10,44	2,21	#84	183	24,33	10,2	2,39
#39	953	50,61	44,78	1,13	#85	57	10,63	5,66	1,88
#40	288	24,7	17,49	1,41	#86	275	21,4	15	1,43
#41	487	38,63	17,09	2,26	#87	301	27,02	15,62	1,73
#42	148	21,1	12,53	1,68	#88	89	21,84	6,32	3,45
#43	444	29,7	24,04	1,24	#89	501	35,06	20,02	1,75
#44	579	34,23	24,19	1,42	#90	218	22,36	12,53	1,78

Tableau A.2.4.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 4 de poudre de classe 1 tassée.

Objet 1.d50.4	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	342,97	26,99	16,11	1,78	#39	597	43,32	23,41	1,85
Ecart	283,54	12,81	7,96	0,56	#40	821	48,47	25,63	1,89
#1	81	13,6	6,4	2,12	#41	57	12,65	6,32	2
#2	345	36,88	12,37	2,98	#42	445	39,81	16,55	2,41
#3	69	10,63	6,4	1,66	#43	382	27,29	22,83	1,2
#4	47	11,18	4,12	2,71	#44	60	11,18	5,83	1,92
#5	437	35,85	15,23	2,35	#45	116	13,93	10,77	1,29
#6	57	9,85	7,62	1,29	#46	100	14,56	9,49	1,53
#7	256	21,54	18,38	1,17	#47	826	47,51	22,02	2,16
#8	843	47,42	28,32	1,67	#48	246	26,57	13,93	1,91
#9	576	40,82	21,95	1,86	#49	464	48,01	15	3,2
#10	1246	52,7	36,06	1,46	#50	565	41,68	22,83	1,83
#11	421	29,68	19,42	1,53	#51	851	39,01	34,01	1,15
#12	148	17,26	13,15	1,31	#52	844	51,22	25,61	2
#13	485	40,5	18,03	2,25	#53	597	43,66	21,19	2,06
#14	81	12,73	9,9	1,29	#54	663	40,31	22,83	1,77
#15	1135	54,41	30,81	1,77	#55	565	34,71	25,5	1,36
#16	289	22,8	19,21	1,19	#56	215	23,71	15,65	1,51
#17	51	14,04	5	2,81	#57	265	27,8	14,21	1,96
#18	112	21,84	8,25	2,65	#58	986	45,28	35,85	1,26
#19	287	21,4	16,4	1,3	#59	181	26,25	11,4	2,3
#20	181	19,85	13,45	1,48	#60	89	19,24	6,08	3,16
#21	143	16,16	10,77	1,5	#61	185	23,85	13,89	1,72
#22	216	21,95	16,12	1,36	#62	325	25,61	24,21	1,06
#23	374	31,89	18,44	1,73	#63	486	28,84	25,24	1,14
#24	50	10,44	5,1	2,05	#64	237	21,02	14,32	1,47
#25	178	21,38	17,26	1,24	#65	117	22,02	6,4	3,44
#26	185	19,24	11,66	1,65	#66	51	9,22	7,07	1,3
#27	60	12,37	6,32	1,96	#67	77	13,42	6,71	2
#28	391	32,89	28,79	1,14	#68	107	15,3	7,07	2,16
#29	573	44,38	18,38	2,41	#69	160	16,64	10,82	1,54
#30	413	25,08	21,93	1,14	#70	791	45,12	31,78	1,42
#31	486	38,6	18,6	2,08	#71	82	12,21	7,21	1,69
#32	356	28,79	20,25	1,42	#72	86	13,45	10,63	1,27
#33	220	31,38	10,82	2,9	#73	178	19,21	14,21	1,35
#34	656	43,46	17,46	2,49	#74	268	22,14	18,03	1,23
#35	610	33,3	24,08	1,38	#75	52	13,34	7,28	1,83
#36	215	19,42	16,64	1,17	#76	94	13,34	8,25	1,62
#37	97	13,6	10	1,36	#77	179	17,49	15,26	1,15
#38	629	40,31	21,93	1,84					

Tableau A.2.5.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 5 de poudre de classe 1 tassée.

Objet 1.d50.5	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	302,96	26,1	15,3	1,88	#37	55	10,63	5,66	1,88
Ecart	241,61	10,4	7,86	0,59	#38	129	18,68	13,34	1,4
#1	582	43,86	27,59	1,59	#39	296	25,71	17,46	1,47
#2	397	42,19	19,1	2,21	#40	329	24,52	19,42	1,26
#3	514	31,91	20,25	1,58	#41	243	22,56	14,32	1,58
#4	151	15,62	14,21	1,1	#42	897	46,1	25,5	1,81
#5	348	31,4	13,15	2,39	#43	75	11,31	8,49	1,33
#6	169	17,46	13,34	1,31	#44	163	17	14,76	1,15
#7	664	43,66	20,25	2,16	#45	101	13,45	10,63	1,27
#8	331	28,18	19,24	1,46	#46	389	26	23,77	1,09
#9	241	27,89	11,4	2,45	#47	53	13,93	4,47	3,11
#10	342	40,25	13,42	3	#48	156	20,25	13,89	1,46
#11	325	32,31	13,93	2,32	#49	276	24,84	15,62	1,59
#12	59	11,66	5,83	2	#50	163	19,24	14,76	1,3
#13	188	25,94	10,3	2,52	#51	371	34,21	16,4	2,09
#14	873	41,18	35,36	1,16	#52	62	13,93	5,39	2,59
#15	73	11,7	5,39	2,17	#53	68	16,64	5	3,33
#16	59	13	4,47	2,91	#54	445	34,06	22,67	1,5
#17	576	41,34	25,24	1,64	#55	235	23,19	13,15	1,76
#18	254	29,83	12,37	2,41	#56	99	19,24	6,71	2,87
#19	112	15,23	13,93	1,09	#57	315	29,41	15,81	1,86
#20	188	28,16	10,44	2,7	#58	172	28,6	12,21	2,34
#21	387	33,53	15,81	2,12	#59	104	19,1	7,07	2,7
#22	418	26,63	19,42	1,37	#60	686	34,89	25,94	1,34
#23	1014	48,1	40,5	1,19	#61	364	28,79	19,31	1,49
#24	615	37,74	22,47	1,68	#62	140	18,03	11,7	1,54
#25	502	34,01	22,85	1,49	#63	1039	47,52	35,36	1,34
#26	677	36,25	29,55	1,23	#64	315	30,59	14,32	2,14
#27	54	15,81	5	3,16	#65	192	24,04	12,65	1,9
#28	515	32,8	25,61	1,28	#66	53	12,17	8,06	1,51
#29	102	16,28	9,9	1,64	#67	174	24,21	12,81	1,89
#30	271	29,83	17,46	1,71	#68	359	29,41	15,81	1,86
#31	50	12,81	4,24	3,02	#69	67	15,65	6,71	2,33
#32	596	40,79	24,52	1,66	#70	138	19,72	8,94	2,21
#33	68	13	7,62	1,71	#71	131	20,81	9,43	2,21
#34	727	48,3	24,6	1,96	#72	498	34,93	21,59	1,62
#35	139	23,35	7,07	3,3	#73	209	20,88	14,56	1,43
#36	207	20,1	15,13	1,33	#74	70	14,87	7,81	1,9

Tableau A.2.6.: Tableau récapitulatif des valeurs moyennes pour la poudre de classe 1 tassée.

	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur de forme
Moyenne	**1.d50.1**	216,19	21,78	12,84	**1,81**
Écart		149,36	7,5	5,34	0,52
Moyenne	**1.d50.2**	274,79	24,09	14,09	**1,8**
Écart		274,72	13,5	7,41	0,48
Moyenne	**1.d50.3**	308,31	25,52	15,39	**1,73**
Écart		277,19	13,6	8,09	0,48
Moyenne	**1.d50.4**	342,97	26,99	16,11	**1,78**
Écart		283,54	12,81	7,96	0,56
Moyenne	**1.d50.5**	302,96	26,1	15,3	**1,88**
Écart		241,61	10,4	7,86	0,59

Annexe 3 : Calcul des valeurs moyennes du facteur de forme pour la poudre de classe 2 tassée.

Tableau A.3.1.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 1 de poudre de classe 2 tassée.

	Objet 2.d50.1	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne		72,88	12,86	6,64	2,07	#48	56	10	6,4	1,56
Ecart		60,48	6,53	3,35	0,77	#49	65	9,85	7,62	1,29
	#1	87	12,81	9,22	1,39	#50	199	26,4	10,77	2,45
	#2	69	18,79	4,47	4,2	#51	24	6,71	5,39	1,25
	#3	64	12,04	7,07	1,7	#52	98	17,89	8,94	2
	#4	96	13	8,54	1,52	#53	30	7,81	5	1,56
	#5	32	7,21	5	1,44	#54	75	12,53	5,83	2,15
	#6	282	35,69	16,28	2,19	#55	141	16,64	11,66	1,43
	#7	39	8,54	6,32	1,35	#56	22	6,32	3,16	2
	#8	49	10	7,21	1,39	#57	28	7,62	3,16	2,41
	#9	102	18,25	7,07	2,58	#58	75	11,31	8,49	1,33
	#10	22	9,43	3,61	2,62	#59	127	17,89	9,85	1,82
	#11	125	15,81	10,82	1,46	#60	42	13,93	4,47	3,11
	#12	36	8,06	5,83	1,38	#61	86	10,82	9,43	1,15
	#13	161	18,25	13,15	1,39	#62	99	17,8	6,4	2,78
	#14	129	24,08	7,07	3,41	#63	31	6,71	4,47	1,5
	#15	58	12,17	6,08	2	#64	139	24,04	8,25	2,92
	#16	40	11,66	5	2,33	#65	22	6,08	3	2,03
	#17	25	6,32	3,16	2	#66	29	7,21	4,47	1,61
	#18	47	13,04	3,61	3,62	#67	29	6,4	4,24	1,51
	#19	61	11,18	7,62	1,47	#68	93	17,49	9,43	1,85
	#20	56	11,31	5,66	2	#69	36	9,49	4,12	2,3
	#21	62	14,32	8,94	1,6	#70	60	12,04	6,4	1,88
	#22	73	14,32	6,08	2,35	#71	231	26,93	11,7	2,3
	#23	111	16,97	7,07	2,4	#72	86	12,53	8,06	1,55
	#24	174	19,42	12,21	1,59	#73	65	9,85	8,54	1,15
	#25	26	7,81	4,24	1,84	#74	173	23,77	16,49	1,44
	#26	276	33,73	14,32	2,36	#75	24	8,06	3	2,69
	#27	21	8,54	3,16	2,7	#76	95	14,87	7,62	1,95
	#28	245	24,7	15,26	1,62	#77	58	12,65	7,28	1,74
	#29	21	7,07	2	3,54	#78	45	10,82	5	2,16
	#30	102	18,03	10,82	1,67	#79	244	43,19	13,04	3,31
	#31	119	17,2	8,6	2	#80	102	17,03	11,4	1,49
	#32	187	20,81	19,42	1,07	#81	60	9,49	8,25	1,15
	#33	87	13,93	8,54	1,63	#82	103	21,21	7,07	3
	#34	205	24,33	15,3	1,59	#83	134	18,38	9,9	1,86
	#35	132	24,08	7,07	3,41	#84	114	21,1	6,08	3,47
	#36	34	9,49	4,12	2,3	#85	69	10,63	7,81	1,36
	#37	27	5,83	4,47	1,3	#86	49	9,85	5,39	1,83
	#38	46	10,3	6,71	1,53	#87	31	9,22	4,12	2,24
	#39	86	13	7,62	1,71	#88	36	9,22	5,1	1,81
	#40	77	15	5	3	#89	101	13,45	10,63	1,27
	#41	63	12,65	6,32	2	#90	87	23,77	5,1	4,66
	#42	103	16,64	8,6	1,93	#91	20	8,06	2	4,03
	#43	55	12,17	6,08	2	#92	69	12,37	7,28	1,7
	#44	32	6,4	5,66	1,13	#93	50	9,49	6,32	1,5
	#45	81	15,03	7	2,15	#94	25	11,05	2	5,52
	#46	36	12,08	3,16	3,82	#95	24	7,28	3,16	2,3
	#47	32	6,71	4,47	1,5	#96	21	5,83	3,61	1,62

	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
	#97	57	11,05	6,08	1,82	#144	55	11,7	5,39	2,17
	#98	21	5,39	4,12	1,31	#145	112	15,23	8,54	1,78
	#99	28	6,4	5	1,28	#146	26	6,71	4,47	1,5
	#100	76	10,82	8,06	1,34	#147	39	9,22	5	1,84
	#101	32	6,71	5,39	1,25	#148	77	13	7,62	1,71
	#102	42	10	3,61	2,77	#149	28	8,06	3,61	2,24
	#103	34	7,62	6,71	1,14	#150	330	32,25	17,12	1,88
	#104	48	12,37	5,1	2,43	#151	19	8,06	2	4,03
	#105	31	6,32	5,39	1,17	#152	160	22,85	8,54	2,67
	#106	79	12,65	7,28	1,74	#153	54	11,4	6,32	1,8
	#107	72	13,89	8,06	1,72	#154	108	14,14	9,9	1,43
	#108	35	9,43	3,61	2,62	#155	46	11,7	4,12	2,84
	#109	54	13,15	5,1	2,58	#156	116	17,89	7,62	2,35
	#110	25	6,08	4,12	1,48	#157	26	9,22	3,16	2,92
	#111	102	18	8	2,25	#158	34	6,71	5,83	1,15
	#112	134	18,11	10,05	1,8	#159	52	8,6	7,21	1,19
	#113	80	16,76	7,28	2,3	#160	41	10	5	2
	#114	119	13,04	10,82	1,21	#161	53	12,04	5	2,41
	#115	63	14,21	5,66	2,51	#162	51	14,32	4,12	3,47
	#116	59	9,85	6,71	1,47	#163	200	33,42	10	3,34
	#117	36	7,81	5,66	1,38	#164	34	8,06	3,61	2,24
	#118	36	6,71	5,83	1,15	#165	20	6,4	3,61	1,78
	#119	27	6,4	3,61	1,78	#166	30	7,21	4,47	1,61
	#120	252	28,28	18,25	1,55	#167	46	8,94	5,83	1,53
	#121	38	12,04	4	3,01	#168	52	10,3	6,71	1,53
	#122	35	6,71	5,83	1,15	#169	64	11,4	6,4	1,78
	#123	67	11,66	8,06	1,45	#170	355	34,18	17,09	2
	#124	154	23,02	9	2,56	#171	27	6,71	4,47	1,5
	#125	274	25	18,6	1,34	#172	89	12,37	9,22	1,34
	#126	69	13,6	6,32	2,15	#173	47	10,3	5,83	1,77
	#127	73	10	8,6	1,16	#174	24	5,83	3,61	1,62
	#128	195	27,07	12,04	2,25	#175	43	12,37	4,12	3
	#129	72	12,53	5,83	2,15	#176	22	6,71	3,16	2,12
	#130	89	12,37	8,25	1,5	#177	60	13,04	6,71	1,94
	#131	28	8,25	3,16	2,61	#178	28	8,25	3,16	2,61
	#132	134	22,36	9,85	2,27	#179	20	5,39	3,16	1,7
	#133	29	8,06	3	2,69	#180	43	9,49	5,39	1,76
	#134	39	9,43	7,21	1,31	#181	46	13,6	4,12	3,3
	#135	58	12,21	5,83	2,09	#182	144	21,21	11,18	1,9
	#136	169	21,19	10,77	1,97	#183	32	11,7	3,16	3,7
	#137	53	9,06	6,08	1,49	#184	21	5,83	3,61	1,62
	#138	72	17,09	4,47	3,82	#185	97	13	10,77	1,21
	#139	121	21,54	9,85	2,19	#186	47	14,14	4,12	3,43
	#140	50	13,42	4,47	3	#187	35	7,28	5,1	1,43
	#141	25	5,83	4,47	1,3	#188	32	6,4	5	1,28
	#142	40	12,65	4,12	3,07	#189	62	12,08	7,62	1,59
	#143	59	12,04	5	2,41	#190	31	7,28	4,12	1,77

	#191	25	7,81	2.83	2,76	#199	34	7,21	5	1,44
	#192	33	9,85	3,61	2,73	#200	23	7,21	3,61	2
	#193	29	11,18	4,47	2,5	#201	29	8,6	3,61	2,39
	#194	22	6,4	3,61	1,78	#202	23	6,32	3,16	2
	#195	46	8,49	7,07	1,2	#203	29	8,25	3,16	2,61
	#196	71	12,04	7,81	1,54	#204	20	4,47	4,47	1
	#197	28	8,54	3,16	2,7	#205	69	15,3	6,08	2,51
	#198	31	6,71	5,39	1,25					

Tableau A.3.2.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 2 de poudre de classe 2 tassée.

	Objet 2.d50.2	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne		62,63	11,55	6,36	1,96	#50	64	10,44	7,28	1,43
Ecart		42,3	4,77	2,66	0,76	#51	28	7,07	4,12	1,71
	#1	75	12,37	7,28	1,7	#52	58	13	4,47	2,91
	#2	156	17,72	11,4	1,55	#53	32	8,94	4,47	2
	#3	57	12,17	5,1	2,39	#54	34	8,6	5	1,72
	#4	52	11,4	6,32	1,8	#55	181	20,12	11,18	1,8
	#5	131	25,55	5,83	4,38	#56	28	9,85	3,16	3,11
	#6	20	6,4	2,83	2,26	#57	48	12,04	6,4	1,88
	#7	73	11,4	8,25	1,38	#58	89	15,13	11,05	1,37
	#8	167	25,32	13,15	1,92	#59	129	18,44	9,22	2
	#9	192	23,19	10,05	2,31	#60	45	9,22	6,4	1,44
	#10	22	7,62	3,16	2,41	#61	35	8,94	4,47	2
	#11	130	17,69	13,45	1,32	#62	100	15,62	9,22	1,69
	#12	52	8,6	7,21	1,19	#63	22	7,07	2,83	2,5
	#13	48	9,22	5,1	1,81	#64	43	8,25	5,1	1,62
	#14	127	14,42	14,42	1	#65	142	28,3	8,06	3,51
	#15	43	9,85	4,47	2,2	#66	71	20,81	5	4,16
	#16	39	10,77	5,39	2	#67	43	9,22	6,08	1,52
	#17	189	23,6	11,4	2,07	#68	24	6,4	3,61	1,78
	#18	26	8,06	3,61	2,24	#69	62	10,77	7,62	1,41
	#19	32	8,54	5,39	1,59	#70	25	5,39	5,39	1
	#20	34	8,06	4,12	1,96	#71	48	11,66	5	2,33
	#21	32	9,06	5,1	1,78	#72	35	7,21	5,83	1,24
	#22	21	5,39	3,16	1,7	#73	22	5,83	3,61	1,62
	#23	26	6,4	3,61	1,78	#74	53	9,43	8,06	1,17
	#24	43	9,22	5	1,84	#75	84	19,31	5,39	3,59
	#25	88	13,42	8,94	1,5	#76	251	25,18	13,15	1,91
	#26	97	17,09	8,54	2	#77	46	10	5,83	1,71
	#27	66	12,08	6,71	1,8	#78	49	9,49	5,39	1,76
	#28	83	11,7	8,54	1,37	#79	37	8,06	5,1	1,58
	#29	44	11,4	6,32	1,8	#80	95	11,7	9,49	1,23
	#30	44	10,44	7,28	1,43	#81	92	15	6,4	2,34
	#31	45	8,94	4,47	2	#82	50	8,25	7,28	1,13
	#32	25	7,28	2,24	3,26	#83	59	10,63	7,81	1,36
	#33	46	11,4	2,83	4,03	#84	32	8,49	4,24	2
	#34	39	7,62	5,39	1,41	#85	40	10	6,4	1,56
	#35	41	8,06	5,83	1,38	#86	146	20,88	9,49	2,2
	#36	93	17,8	6,4	2,78	#87	25	7,21	5	1,44
	#37	121	14,42	10,82	1,33	#88	63	13,42	4,47	3
	#38	50	12,21	6,4	1,91	#89	88	11,66	10,3	1,13
	#39	64	12,21	7,81	1,56	#90	35	7,21	5	1,44
	#40	30	7,81	4,24	1,84	#91	45	8,94	4,47	2
	#41	48	10,05	6,08	1,65	#92	49	10	5,83	1,71
	#42	21	6,4	2,83	2,26	#93	27	8,25	3,16	2,61
	#43	102	13,6	10	1,36	#94	45	9,85	5,39	1,83
	#44	61	10	8,6	1,16	#95	84	12,21	10	1,22
	#45	85	12,17	9,22	1,32	#96	89	16,12	5,83	2,77
	#46	171	21,19	14,87	1,43	#97	56	9,22	7,81	1,18
	#47	41	9,43	5	1,89	#98	52	8,94	6,71	1,33
	#48	20	5,83	2,24	2,61	#99	37	7,62	5,39	1,41
	#49	38	7,28	5,1	1,43	#100	79	17,46	5,1	3,43

	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
	#101	26	6,08	4,12	1,48	#146	32	8,54	3,16	2,7
	#102	35	10	5	2	#147	35	11,7	3,16	3,7
	#103	79	14,76	5,83	2,53	#148	36	9,22	5	1,84
	#104	107	18,25	7,07	2,58	#149	47	9,22	7,81	1,18
	#105	131	23,26	10,3	2,26	#150	34	9,22	5,1	1,81
	#106	43	8,94	5,83	1,53	#151	96	13,04	9,43	1,38
	#107	222	27,46	10	2,75	#152	120	15,81	12,21	1,3
	#108	41	8,54	5,39	1,59	#153	79	12,81	7,81	1,64
	#109	67	13,6	6,4	2,12	#154	80	13,34	10,2	1,31
	#110	25	5,39	4,47	1,2	#155	79	11,7	8,54	1,37
	#111	45	10,2	4,12	2,47	#156	39	9,85	6,32	1,56
	#112	35	8,25	4,12	2	#157	51	9,85	7,62	1,29
	#113	34	8,6	3,61	2,39	#158	103	11,7	10,77	1,09
	#114	64	11,7	8,54	1,37	#159	55	13,15	6,08	2,16
	#115	59	15,52	4,12	3,77	#160	26	7,21	5	1,44
	#116	60	11,7	5,39	2,17	#161	20	9,49	2,24	4,24
	#117	49	8,6	7,21	1,19	#162	80	18,25	7,07	2,58
	#118	53	10,77	5,39	2	#163	66	11,7	5,39	2,17
	#119	24	7,07	3	2,36	#164	25	8,6	2,83	3,04
	#120	100	15,65	7,62	2,06	#165	37	9,49	6,32	1,5
	#121	73	11,66	8,06	1,45	#166	28	12,37	2,24	5,53
	#122	56	9,85	7,62	1,29	#167	44	11,18	5,1	2,19
	#123	37	7,28	5,1	1,43	#168	22	6,08	4,12	1,48
	#124	20	6,4	2,83	2,26	#169	26	6,4	5	1,28
	#125	145	16,49	12,37	1,33	#170	28	8,49	4,24	2
	#126	54	9,22	6,4	1,44	#171	96	16,49	9,22	1,79
	#127	37	7,21	5,83	1,24	#172	25	6,71	4,47	1,5
	#128	23	6,32	3,16	2	#173	114	17,26	6,08	2,84
	#129	215	22,56	13,34	1,69	#174	23	6,4	2,83	2,26
	#130	108	19,65	9,22	2,13	#175	120	23,77	6,32	3,76
	#131	29	8,25	3,16	2,61	#176	77	10,82	8,6	1,26
	#132	44	8,06	5,83	1,38	#177	79	15	5	3
	#133	42	8,54	6,32	1,35	#178	34	8,25	5,1	1,62
	#134	54	12,81	7,21	1,78	#179	105	21,84	9,22	2,37
	#135	28	6,4	5	1,28	#180	83	11,7	8,54	1,37
	#136	63	10,05	10,05	1	#181	112	17,26	8,25	2,09
	#137	79	12,53	10,3	1,22	#182	73	12,65	6,32	2
	#138	54	14,32	5,1	2,81	#183	57	10,63	5	2,13
	#139	28	11,4	3,16	3,61	#184	28	6,71	4,47	1,5
	#140	53	10	6,4	1,56	#185	38	6,71	5,83	1,15
	#141	53	10,44	8,25	1,27	#186	21	5,1	4,12	1,24
	#142	28	10	2,83	3,54	#187	97	13,6	9,49	1,43
	#143	66	11,4	6,32	1,8	#188	29	9,22	3,16	2,92
	#144	24	8,06	3,16	2,55	#189	24	8,6	2,24	3,85
	#145	37	8,25	5,1	1,62					

Tableau A.3.3.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 3 de poudre de classe 2 tassée.

	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	**2.d50.3**	66,18	12,22	6,42	**2,06**	#53	82	15,56	5,66	2,75
Ecart		45,18	5,29	2,78	0,87	#54	38	8,94	4,47	2
	#1	35	8,54	5,39	1,59	#55	54	9,85	6,32	1,56
	#2	64	12,08	7,62	1,59	#56	23	7,07	3	2,36
	#3	56	13,93	5,39	2,59	#57	97	15,3	8,25	1,86
	#4	47	10,82	5,83	1,86	#58	29	10,2	3,16	3,22
	#5	118	25,63	5,39	4,76	#59	83	13,93	7,62	1,83
	#6	63	12,81	7,21	1,78	#60	49	8,94	5,83	1,53
	#7	39	9,22	6,4	1,44	#61	58	9,22	7,81	1,18
	#8	46	18,25	3	6,08	#62	62	10,2	8,25	1,24
	#9	66	10,2	9,22	1,11	#63	23	9,85	2,24	4,4
	#10	123	28,64	6,08	4,71	#64	30	7,28	4,12	1,77
	#11	70	14,42	6,4	2,25	#65	96	15,81	8,6	1,84
	#12	91	15,52	9,22	1,68	#66	118	22,85	9,85	2,32
	#13	102	13,6	9,49	1,43	#67	205	23,6	12,21	1,93
	#14	63	12,04	5,66	2,13	#68	28	7,07	5,1	1,39
	#15	40	8,54	5,39	1,59	#69	99	13,6	9,49	1,43
	#16	78	18,36	6,71	2,74	#70	110	15	9,22	1,63
	#17	38	6,71	6,71	1	#71	50	10,3	6,71	1,53
	#18	212	21,26	14,21	1,5	#72	59	9,49	7,62	1,25
	#19	86	16,4	7,81	2,1	#73	65	11,31	8,49	1,33
	#20	55	10	6,4	1,56	#74	22	7,21	3,61	2
	#21	114	20,59	8,06	2,55	#75	83	10,77	8,54	1,26
	#22	20	5,1	3,16	1,61	#76	31	7,81	5	1,56
	#23	46	9,22	6,08	1,52	#77	50	10,05	5,1	1,97
	#24	110	13,6	11,4	1,19	#78	31	9,43	3,61	2,62
	#25	69	13,42	5,83	2,3	#79	26	9,22	3,16	2,92
	#26	24	6,71	3,61	1,86	#80	39	12,21	2,24	5,46
	#27	36	8,6	5	1,72	#81	45	11,4	4,12	2,77
	#28	57	13,6	6,4	2,12	#82	43	9,9	5,66	1,75
	#29	81	12,81	7,21	1,78	#83	43	12,08	4,47	2,7
	#30	109	14,32	9,22	1,55	#84	45	8,6	6,4	1,34
	#31	64	11,18	6,71	1,67	#85	20	6,4	2,83	2,26
	#32	95	12,08	9,85	1,23	#86	56	9,85	6,71	1,47
	#33	71	12,37	7,28	1,7	#87	26	7,21	3,61	2
	#34	32	11,18	3,16	3,54	#88	126	15,26	10,82	1,41
	#35	91	11,4	10,63	1,07	#89	141	15,23	13	1,17
	#36	67	13,6	5,39	2,53	#90	70	13,42	6,71	2
	#37	79	17,46	6,08	2,87	#91	28	6,4	4,24	1,51
	#38	20	5,66	3,61	1,57	#92	22	6,71	3,16	2,12
	#39	74	11,4	7,81	1,46	#93	111	18,11	7,07	2,56
	#40	102	14,42	8,6	1,68	#94	79	12,04	6,4	1,88
	#41	316	33,42	25,61	1,3	#95	33	7,62	5,39	1,41
	#42	27	7,62	4,47	1,7	#96	42	8,54	5,39	1,59
	#43	44	12,17	4,12	2,95	#97	122	18,44	7,81	2,36
	#44	21	5,83	3,61	1,62	#98	33	8,54	4,47	1,91
	#45	85	16,49	6,32	2,61	#99	86	14,21	10	1,42
	#46	27	7,62	2,24	3,41	#100	91	12,04	8,49	1,42
	#47	138	26,93	7,62	3,54	#101	66	10,44	7,28	1,43
	#48	29	8,49	4,24	2	#102	54	9,49	5,39	1,76
	#49	111	19,1	8,06	2,37	#103	69	12,81	11,4	1,12
	#50	46	8,94	6,71	1,33	#104	46	8,54	6,32	1,35
	#51	23	8,54	3,16	2,7	#105	31	7,81	4,24	1,84
	#52	102	20,25	6,32	3,2	#106	57	13,93	6,32	2,2

	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
	#107	51	10,77	6,32	1,7	#157	110	15,81	8,54	1,85
	#108	96	18,44	8,25	2,24	#158	49	8,94	5,83	1,53
	#109	77	22	5	4,4	#159	22	6,08	3,16	1,92
	#110	55	10,82	5,83	1,86	#160	20	6,71	4,47	1,5
	#111	26	6,4	3,61	1,78	#161	35	7,62	5,39	1,41
	#112	103	19,65	6,32	3,11	#162	20	5,39	3,16	1,7
	#113	69	10,77	7,62	1,41	#163	126	15,62	10,63	1,47
	#114	28	6,71	4,47	1,5	#164	39	12,17	4,12	2,95
	#115	82	12,08	7,62	1,59	#165	32	9,85	3,16	3,11
	#116	45	11	6	1,83	#166	23	5,39	4,47	1,2
	#117	36	14,14	4,24	3,33	#167	50	9,49	5,39	1,76
	#118	28	8	4	2	#168	126	21,59	8,25	2,62
	#119	61	12,53	5,83	2,15	#169	55	13,15	5,1	2,58
	#120	71	12,37	9,22	1,34	#170	266	32,56	11,18	2,91
	#121	78	11,4	8,6	1,33	#171	84	13,6	7,28	1,87
	#122	22	7,81	2,83	2,76	#172	72	10,82	8,06	1,34
	#123	46	8,6	7,21	1,19	#173	67	12,65	6,32	2
	#124	21	8,06	3	2,69	#174	71	11,7	8,54	1,37
	#125	54	12,08	7,62	1,59	#175	108	14,87	9,22	1,61
	#126	28	8,25	3,16	2,61	#176	41	11,05	5	2,21
	#127	31	8,6	3,61	2,39	#177	59	8,94	7,62	1,17
	#128	25	7,62	5,39	1,41	#178	60	10,77	6,71	1,61
	#129	22	10	2,24	4,47	#179	78	14,14	8,49	1,67
	#130	105	17,09	10,77	1,59	#180	227	33,06	10,05	3,29
	#131	55	11,18	5,1	2,19	#181	48	14,14	4,24	3,33
	#132	22	5,39	4,12	1,31	#182	126	17,09	8,54	2
	#133	42	8,49	5,66	1,5	#183	98	16,28	8,06	2,02
	#134	66	11,05	7,07	1,56	#184	22	6,08	4,12	1,48
	#135	44	10,77	5,39	2	#185	50	9,49	5,39	1,76
	#136	212	24,33	11,18	2,18	#186	33	8,94	3,61	2,48
	#137	150	25,94	8,94	2,9	#187	96	11,4	10	1,14
	#138	70	10,82	7,21	1,5	#188	45	11,7	6,32	1,85
	#139	23	9	2	4,5	#189	32	7,21	5,83	1,24
	#140	138	15,81	12,21	1,3	#190	62	17,69	4,24	4,17
	#141	77	17,03	6,4	2,66	#191	63	12,17	7,07	1,72
	#142	80	13,15	7,07	1,86	#192	44	9,49	5,39	1,76
	#143	18	10,2	2	5,1	#193	62	9,49	7,28	1,3
	#144	132	25,3	6,32	4	#194	25	7,28	3,16	2,3
	#145	24	5,83	3,61	1,62	#195	26	7,07	4,24	1,67
	#146	35	8,6	6,4	1,34	#196	78	12,53	8,06	1,55
	#147	112	20,1	8,06	2,49	#197	21	9,85	2,24	4,4
	#148	86	13,42	8,06	1,66	#198	78	10,77	8,54	1,26
	#149	32	7,07	5,66	1,25	#199	82	15,52	7,28	2,13
	#150	27	7,62	3,16	2,41	#200	85	13,89	8,06	1,72
	#151	56	12,04	5	2,41	#201	24	6,32	3,16	2
	#152	31	8,25	4,12	2	#202	33	7,21	5	1,44
	#153	31	6,71	4,47	1,5	#203	77	12,21	8,6	1,42
	#154	170	26	12,08	2,15	#204	34	8,06	4,47	1,8
	#155	175	17,2	12,21	1,41	#205	52	9,22	6,08	1,52
	#156	35	8,06	4,12	1,96	#206	47	12,17	6,08	2

Tableau A.3.4.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 4 de poudre de classe 2 tassée.

	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	**2.d50.4**	61,04	11,66	6,07	**2,04**	#52	83	11,7	8,54	1,37
Ecart		45,81	5,47	2,51	0,81	#53	40	11,4	5,1	2,24
	#1	51	10,3	5,83	1,77	#54	35	10,05	3	3,35
	#2	78	12,08	8,94	1,35	#55	47	9,85	5,39	1,83
	#3	22	5,66	4,24	1,33	#56	46	12,04	2,83	4,26
	#4	36	8,6	5	1,72	#57	24	7,28	2,24	3,26
	#5	24	7,07	4,24	1,67	#58	62	13,04	7,21	1,81
	#6	128	15,26	10,82	1,41	#59	41	8,06	5,83	1,38
	#7	21	7,21	3,61	2	#60	92	19,21	6,4	3
	#8	99	21,38	5,1	4,19	#61	125	14,21	11,4	1,25
	#9	78	12,37	7,28	1,7	#62	36	7,28	5,1	1,43
	#10	47	9,85	6,71	1,47	#63	31	7,21	5	1,44
	#11	192	20,59	15,65	1,32	#64	60	12,65	5,39	2,35
	#12	67	16,28	6,08	2,68	#65	43	10,05	6,08	1,65
	#13	38	14,32	4,47	3,2	#66	23	6,71	3,61	1,86
	#14	411	51,48	14,14	3,64	#67	60	8,94	6,71	1,33
	#15	23	9,22	2	4,61	#68	87	14,04	8,06	1,74
	#16	28	7,81	4,24	1,84	#69	41	8,6	5	1,72
	#17	57	11,05	7,07	1,56	#70	35	7,28	5,1	1,43
	#18	113	17,2	13,6	1,26	#71	114	24,19	8,06	3
	#19	26	6,4	5	1,28	#72	28	8	4	2
	#20	45	8,94	5,39	1,66	#73	58	13	5,39	2,41
	#21	158	17,09	11,7	1,46	#74	30	8,54	4,47	1,91
	#22	56	11,7	6,32	1,85	#75	185	19,7	12,08	1,63
	#23	129	25,5	4,47	5,7	#76	34	10,3	4,47	2,3
	#24	56	12,17	5,1	2,39	#77	40	13,89	3,61	3,85
	#25	36	7,28	5,1	1,43	#78	87	18,44	7,28	2,53
	#26	52	9,06	7,07	1,28	#79	41	9,9	5,66	1,75
	#27	32	8,94	4,47	2	#80	43	10	5	2
	#28	66	11,7	6,32	1,85	#81	86	15,03	11,05	1,36
	#29	56	14,42	5,83	2,47	#82	119	18,44	9,22	2
	#30	155	25,32	10,2	2,48	#83	40	9,22	5	1,84
	#31	116	14,56	10,44	1,39	#84	100	15,81	9,43	1,68
	#32	137	17,2	12,21	1,41	#85	31	8,54	4,47	1,91
	#33	46	8,6	7,21	1,19	#86	42	8,06	5,83	1,38
	#34	56	12,17	6,08	2	#87	25	8,06	4	2,02
	#35	43	9,85	5,39	1,83	#88	42	12,04	3,61	3,34
	#36	125	14,21	11,4	1,25	#89	32	9,85	3,61	2,73
	#37	39	9,85	5,39	1,83	#90	44	9,22	5,1	1,81
	#38	182	23,02	10	2,3	#91	24	6,71	3,61	1,86
	#39	21	8,06	2,24	3,61	#92	63	11,18	6,71	1,67
	#40	30	7,81	3,61	2,17	#93	44	10,82	5	2,16
	#41	33	8,06	5,1	1,58	#94	88	15,62	5,66	2,76
	#42	19	7,62	3,16	2,41	#95	23	5,39	4,47	1,2
	#43	28	5,39	5,39	1	#96	46	8,94	5,83	1,53
	#44	32	7,07	4,12	1,71	#97	150	28,44	10,2	2,79
	#45	20	5,39	3,16	1,7	#98	24	6,08	4,12	1,48
	#46	22	6,4	2,83	2,26	#99	236	25,18	13,15	1,91
	#47	88	13,89	5,83	2,38	#100	61	13,42	5,39	2,49
	#48	100	17,09	8,54	2	#101	104	21,26	7,81	2,72
	#49	39	8,6	5	1,72	#102	44	10	5,83	1,71
	#50	52	12,17	6,08	2	#103	99	12,53	8,94	1,4
	#51	24	6,08	4,12	1,48	#104	51	8,06	6,71	1,2

	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
	#105	55	10,63	7,81	1,36	#154	26	6	5	1,2
	#106	26	7,62	4,47	1,7	#155	78	13,04	8,06	1,62
	#107	30	7,81	4,24	1,84	#156	59	11,05	9,06	1,22
	#108	40	8,54	5,39	1,59	#157	39	7,81	6,4	1,22
	#109	134	20,62	8,94	2,3	#158	69	11,4	9,22	1,24
	#110	59	13,04	5,83	2,24	#159	50	13,6	5,39	2,53
	#111	161	23,09	9,49	2,43	#160	21	6,4	3,61	1,78
	#112	86	11,4	10	1,14	#161	49	9,43	5,83	1,62
	#113	36	7,21	5	1,44	#162	40	10,44	3,16	3,3
	#114	47	10,63	5,66	1,88	#163	38	8,25	5,1	1,62
	#115	26	8,54	3,16	2,7	#164	65	11,4	6,4	1,78
	#116	40	9,49	4,12	2,3	#165	31	7,81	5	1,56
	#117	74	10,3	8,06	1,28	#166	31	8,94	3,16	2,83
	#118	56	8,6	7,81	1,1	#167	31	11,4	3,16	3,61
	#119	51	9,85	7,62	1,29	#168	33	9,43	4,47	2,11
	#120	35	8,06	4,12	1,96	#169	20	6,71	3,16	2,12
	#121	78	17,46	5,1	3,43	#170	44	8,6	6,4	1,34
	#122	24	6,32	4,12	1,53	#171	26	10,2	3,16	3,22
	#123	33	9,9	4,24	2,33	#172	67	13,34	5,1	2,62
	#124	78	13,42	6,71	2	#173	79	13,93	9,49	1,47
	#125	105	18,25	7,07	2,58	#174	75	12,21	7,21	1,69
	#126	133	23,26	10,3	2,26	#175	23	5,83	4,47	1,3
	#127	41	8,94	5,83	1,53	#176	42	8,54	5,39	1,59
	#128	39	8,25	5,1	1,62	#177	74	11,7	8,54	1,37
	#129	90	15,23	7,62	2	#178	57	11,18	4,47	2,5
	#130	66	13,42	5,83	2,3	#179	27	12,53	2,24	5,6
	#131	33	9,06	4	2,26	#180	103	11,66	10,3	1,13
	#132	44	10,2	4,12	2,47	#181	49	9,9	7,07	1,4
	#133	113	20,62	6,32	3,26	#182	52	9,22	6,4	1,44
	#134	59	11,4	9,22	1,24	#183	24	5,83	4,47	1,3
	#135	29	7,62	4,47	1,7	#184	45	11,18	5,39	2,08
	#136	54	15,3	3,16	4,84	#185	63	12,08	5,39	2,24
	#137	51	8,49	7,81	1,09	#186	26	9,43	2,83	3,34
	#138	46	10,3	5,83	1,77	#187	29	7,07	5,1	1,39
	#139	20	6,08	3	2,03	#188	33	10,2	4,12	2,47
	#140	107	16,55	7,62	2,17	#189	29	9,22	4,24	2,17
	#141	57	13,45	5,66	2,38	#190	121	21,63	7,21	3
	#142	75	12,08	7,62	1,59	#191	44	10,2	5,1	2
	#143	50	8,94	6,71	1,33	#192	22	7,07	3	2,36
	#144	36	7,28	5,1	1,43	#193	92	16,28	9,22	1,77
	#145	19	6,32	2,24	2,83	#194	20	6,71	3,61	1,86
	#146	143	16,76	12,65	1,33	#195	103	17,26	6,08	2,84
	#147	51	9,22	6,4	1,44	#196	114	24,17	5,39	4,49
	#148	33	7,21	5	1,44	#197	79	10,82	9,43	1,15
	#149	23	6,71	3,16	2,12	#198	21	6,32	3,16	2
	#150	128	15,62	9,22	1,69	#199	74	14,76	5,39	2,74
	#151	29	8,06	4	2,02	#200	30	8,25	4,12	2
	#152	42	7,81	5,66	1,38	#201	88	22,14	7,28	3,04
	#153	38	8,06	5,83	1,38	#202	31	7,62	4,47	1,7

Tableau A.3.5.: Tableau récapitulatif des valeurs moyennes pour la poudre de classe 2 tassée.

	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur de forme
Moyenne	**2.d50.1**	72,88	12,86	6,64	**2,07**
Ecart		60,48	6,53	3,35	0,77
Moyenne	**2.d50.2**	62,63	11,55	6,36	**1,96**
Ecart		42,3	4,77	2,66	0,76
Moyenne	**2.d50.3**	66,18	12,22	6,42	**2,06**
Ecart		45,18	5,29	2,78	0,87
Moyenne	**2.d50.4**	61,04	11,66	6,07	**2,04**
Ecart		45,81	5,47	2,51	0,81

Annexe 4: Calcul des valeurs moyennes du facteur de forme pour la poudre de classe 1+2 tassée.

Tableau A.4.1.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 1 de poudre de classe 1+2 tassée.

Objet 3d501	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	318,94	27,1	15,56	**1,81**	#26	238	21,54	15,23	1,41
Ecart	323,45	15,18	7,86	0,61	#27	153	18,03	10,82	1,67
#1	142	19,85	12,04	1,65	#28	81	15,81	5,83	2,71
#2	169	19,42	11,18	1,74	#29	103	12,17	10,2	1,19
#3	415	26,57	20,25	1,31	#30	238	24,19	18,36	1,32
#4	248	30	17,8	1,68	#31	354	26,57	17,09	1,55
#5	81	12,73	8,49	1,5	#32	453	50,01	14,32	3,49
#6	1075	49,98	42,38	1,18	#33	667	39,36	25,94	1,52
#7	259	19,42	18,44	1,05	#34	110	16,76	8,54	1,96
#8	135	17,12	9,06	1,89	#35	98	14,32	12,08	1,18
#9	361	30,02	17,49	1,72	#36	205	19,24	12,53	1,54
#10	89	21,02	5,83	3,61	#37	593	38,33	23,77	1,61
#11	342	32,06	14,04	2,28	#38	307	26	18,38	1,41
#12	328	24,76	19,1	1,3	#39	85	12,17	8,06	1,51
#13	112	14,32	10,2	1,4	#40	1087	60,64	40,02	1,52
#14	539	45,12	23,54	1,92	#41	487	46,23	19,21	2,41
#15	2242	109,11	39,85	2,74	#42	356	29,61	16,28	1,82
#16	116	15,23	10,77	1,41	#43	820	47,43	37	1,28
#17	143	17,46	15,3	1,14	#44	259	26,25	14,21	1,85
#18	98	14,76	7,21	2,05	#45	111	18,25	9,22	1,98
#19	127	24,02	10	2,4	#46	115	15,81	10,44	1,51
#20	468	33,96	19,42	1,75	#47	91	15,81	6,32	2,5
#21	326	22,8	17,72	1,29	#48	316	22,8	15,52	1,47
#22	512	33,11	21,02	1,57	#49	371	29,43	15,3	1,92
#23	250	21,47	15,65	1,37	#50	471	41,34	15,26	2,71
#24	250	36,88	9,22	4	#66	113	22,36	10,2	2,19
#25	462	41,19	25,08	1,64	#67	205	22,36	13,42	1,67

Tableau A.4.2.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 2 de poudre de classe 1+2 tassée.

Objet 3d502	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	288,38	25,36	14,99	**1,78**	#33	89	16,64	8,6	1,93
Ecart	255,51	12,59	6,78	0,65	#34	104	16,76	8,25	2,03
#1	181	30,89	10,3	3	#35	1375	73,6	35	2,1
#2	102	14,42	8,06	1,79	#36	440	36,67	22,36	1,64
#3	174	19,42	14,42	1,35	#37	215	28,79	11,7	2,46
#4	94	13,42	6,71	2	#38	136	16,76	12,65	1,33
#5	836	41,3	32,25	1,28	#39	290	26	19,7	1,32
#6	123	21,4	12,21	1,75	#40	1114	71,4	30	2,38
#7	581	41,44	27,86	1,49	#41	91	14,87	7,62	1,95
#8	138	18,87	10,82	1,74	#42	616	36,62	21,63	1,69
#9	91	13,04	9,43	1,38	#43	81	10,3	8,94	1,15
#10	275	22,83	14,76	1,55	#44	511	30,87	23,26	1,33
#11	438	29,73	18,03	1,65	#45	101	14,87	12,65	1,18
#12	453	31,78	21,93	1,45	#46	347	33,12	14,76	2,24
#13	83	21,19	4,12	5,14	#47	117	15,3	11,18	1,37
#14	298	25,81	18,6	1,39	#48	370	33,62	15,23	2,21
#15	340	25,81	18,6	1,39	#49	347	32,25	19,1	1,69
#16	141	14,87	10,77	1,38	#50	413	28,18	21,47	1,31
#17	472	41,68	18,36	2,27	#51	275	21,1	18,11	1,16
#18	317	26,93	21,84	1,23	#52	644	32,98	27,89	1,18
#19	100	13	12,08	1,08	#53	322	29,27	17,12	1,71
#20	86	19,1	5,1	3,75	#54	221	30,81	11,18	2,76
#21	96	15,81	9,43	1,68	#55	816	48,6	25	1,94
#22	113	12,65	10,44	1,21	#56	291	33,54	17,26	1,94
#23	149	16,16	10,77	1,5	#57	205	21,93	14,32	1,53
#24	106	15,81	8,6	1,84	#58	111	16,28	8,25	1,97
#25	200	24,6	15,65	1,57	#59	187	15,3	14,32	1,07
#26	230	20,02	14,04	1,43	#60	314	28,02	18,03	1,55
#27	532	42,94	20,12	2,13	#61	87	14,21	7,21	1,97
#28	306	23,32	21,1	1,11	#62	148	24,08	9,06	2,66
#29	144	19,24	10,2	1,89	#63	105	15	7,81	1,92
#30	95	13,34	9,22	1,45	#64	146	15,65	13,42	1,17
#31	752	46,62	20,81	2,24	#65	127	23,02	12	1,92
#32	120	15,26	8,06	1,89	#66	111	14,42	9,43	1,53

Tableau A.4.3.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 3 de poudre de classe 1+2 tassée.

Objet 3.d503	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	265,71	24,01	14,04	1,8	#31	513	38,48	21,93	1,75
Ecart	223,29	11,22	6,63	0,66	#32	278	27,29	14,14	1,93
#1	169	15,81	14,42	1,1	#33	84	12,37	8,25	1,5
#2	122	13,42	10,3	1,3	#34	397	26,31	18,25	1,44
#3	252	19,85	17,03	1,17	#35	120	15	8,6	1,74
#4	378	39	13,93	2,8	#36	136	15	11,4	1,32
#5	81	15	6,4	2,34	#37	109	14,87	9,49	1,57
#6	132	18,25	9,22	1,98	#38	210	18,03	13,6	1,33
#7	943	54,41	31,32	1,74	#39	255	21,1	17,49	1,21
#8	103	15,26	8,6	1,77	#40	84	12,21	8,6	1,42
#9	265	23,43	14,87	1,58	#41	234	21,54	13,93	1,55
#10	771	45,71	29,43	1,55	#42	415	32,25	22,83	1,41
#11	271	22,2	16,12	1,38	#43	96	12,17	9,06	1,34
#12	1147	59,91	32,45	1,85	#44	419	28,28	18,25	1,55
#13	98	18,03	7,21	2,5	#46	128	17,09	8,54	2
#14	87	15,65	5,83	2,68	#47	147	17,89	11,18	1,6
#15	273	21,4	15,62	1,37	#48	142	17,49	13,04	1,34
#16	466	42,01	17	2,47	#49	128	13,89	10,3	1,35
#17	84	13,6	7,28	1,87	#50	178	18,38	12,08	1,52
#18	536	40,5	23,85	1,7	#51	197	22,83	13,89	1,64
#19	145	26,31	10,05	2,62	#52	109	13,93	9,49	1,47
#20	458	29,43	22,36	1,32	#53	83	12,37	8,25	1,5
#21	228	31,58	9,22	3,42	#54	282	39,81	10,2	3,9
#22	196	31,78	9,22	3,45	#55	175	28,44	7,07	4,02
#23	731	42,45	31,05	1,37	#56	183	20,4	12,37	1,65
#24	543	35	20	1,75	#57	126	18,6	10	1,86
#25	136	20,1	12,04	1,67	#58	93	14,21	7,81	1,82
#26	366	25,61	17,8	1,44	#59	170	17,03	12,04	1,41
#27	84	11,66	9,43	1,24	#60	99	13	8,54	1,52
#28	161	17,49	13,04	1,34	#61	246	26	13	2
#29	462	36,35	21,21	1,71	#62	150	27,29	8,06	3,39
#30	83	11,4	8,6	1,33	#63	229	21,54	20,25	1,06

Tableau A.4.4.: Calcul du facteur de forme pour la mesure no. 4 de poudre de classe 1+2 tassée.

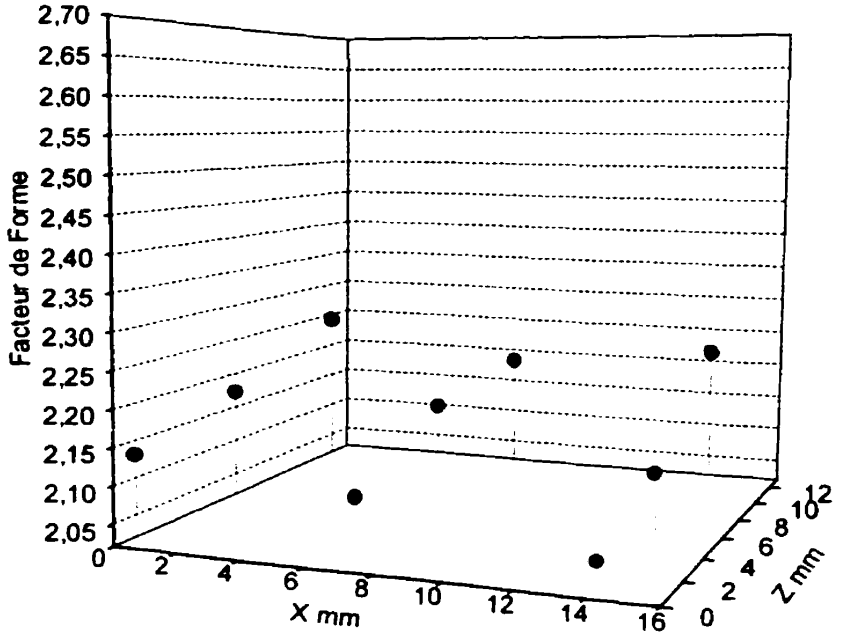
Objet 3.d504	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f.	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	F.f
Moyenne	273,37	24,78	14,88	1,71	#40	365	33,84	14,87	2,28
Ecart	244,46	12,77	6,92	0,48	#41	261	22,67	18,44	1,23
#1	1069	50,25	31,14	1,61	#42	144	20,12	8,94	2,25
#2	85	20,1	8,06	2,49	#43	348	34,83	19,21	1,81
#3	154	17,49	10,3	1,7	#44	121	17,49	9,43	1,85
#4	162	18,25	12,17	1,5	#45	107	14,32	8,94	1,6
#5	101	13,6	10,44	1,3	#46	83	11,7	9,49	1,23
#6	529	37,12	24,08	1,54	#47	667	33,02	25,24	1,31
#7	123	17,12	8,06	2,12	#48	195	23,77	10,77	2,21
#8	368	27,86	20,25	1,38	#49	100	13,34	9,22	1,45
#9	261	21,63	14,42	1,5	#50	108	13,04	11,66	1,12
#10	96	14,87	11,7	1,27	#51	711	58,52	34,18	1,71
#11	568	37,44	30,23	1,24	#52	96	13,6	11,4	1,19
#12	326	27,02	17,8	1,52	#53	200	20,52	18,38	1,12
#13	222	21,93	18,38	1,19	#54	381	33,02	17,2	1,92
#14	117	20,12	6,71	3	#55	147	17,09	10,77	1,59
#15	112	19,42	8,6	2,26	#56	87	13,6	10	1,36
#16	189	18,44	13,34	1,38	#57	128	16,16	11,7	1,38
#17	473	36,4	19,65	1,85	#58	89	16,4	10	1,64
#18	273	23,77	17,09	1,39	#59	154	17	10,3	1,65
#19	531	37,34	25,18	1,48	#60	482	39,62	20,52	1,93
#20	89	17,26	7,07	2,44	#61	95	12,17	10,2	1,19
#21	187	18,36	13,89	1,32	#62	123	15,52	9,22	1,68
#22	169	21,1	10,3	2,05	#63	217	21,54	15,23	1,41
#23	518	29,55	25,08	1,18	#64	530	29,12	21,84	1,33
#24	313	24,7	21,1	1,17	#65	371	39,4	20,62	1,91
#25	538	47,13	20,88	2,26	#66	662	40,82	32,76	1,25
#26	87	11,4	10	1,14	#67	659	60,88	17,46	3,49
#27	108	14,32	9,22	1,55	#68	336	39,66	13,04	3,04
#28	98	13,6	8,25	1,65	#69	160	18,87	13,04	1,45
#29	328	29,43	14,14	2,08	#70	372	29,83	16,49	1,81
#30	384	33,3	19,1	1,74	#71	91	16,4	6,4	2,56
#31	89	14,56	9,49	1,53	#72	79	14,14	5,1	2,77
#32	96	15,26	8,06	1,89	#73	83	12,37	8,25	1,5
#33	583	48,27	20,62	2,34	#74	141	17,09	11,7	1,46
#34	201	22,02	12,81	1,72	#75	330	30,68	16,76	1,83
#35	187	18,38	13	1,41	#76	212	23,54	14,32	1,64
#36	130	21,21	10,05	2,11	#77	254	26,48	12,17	2,18
#37	1591	82,22	38,29	2,15	#78	346	29,15	21,1	1,38
#38	200	23,6	20	1,18	#79	93	13,93	8,54	1,63
#39	170	18,38	12,08	1,52	#80	93	14,32	9,85	1,45
					#81	97	13,45	9,22	1,46

Tableau A.4.5.: Tableau récapitulatif des valeurs moyennes pour la poudre de classe 1+2 tassée.

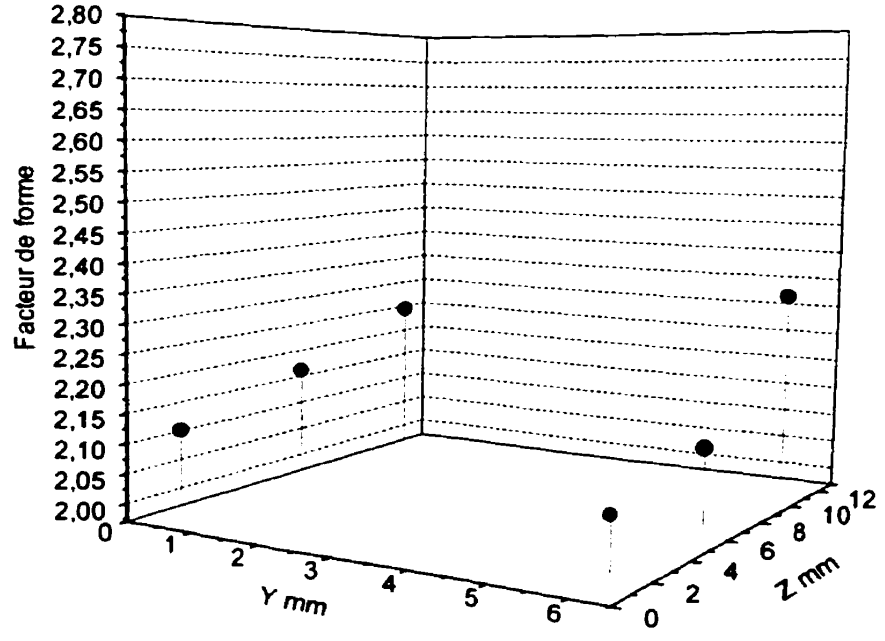
	Objet	Surface [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur de forme
Moyenne	**3.d50.1**	318,94	27,1	15,56	**1,81**
Ecart		323,45	15,18	7,86	0,61
Moyenne	**3.d50.2**	288,38	25,36	14,99	**1,78**
Ecart		255,51	12,59	6,78	0,65
Moyenne	**3.d50.3**	265,71	24,01	14,04	**1,8**
Ecart		223,29	11,22	6,63	0,66
Moyenne	**3.d50.4**	273,37	24,78	14,88	**1,71**
Ecart		244,46	12,77	6,92	0,48

Annexe 5 : Distribution schématique du facteur de forme moyen.

Pressage à 275 MPa (20 tsi) de poudre de classe 1 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 4) et section transversale (Échantillon 5).

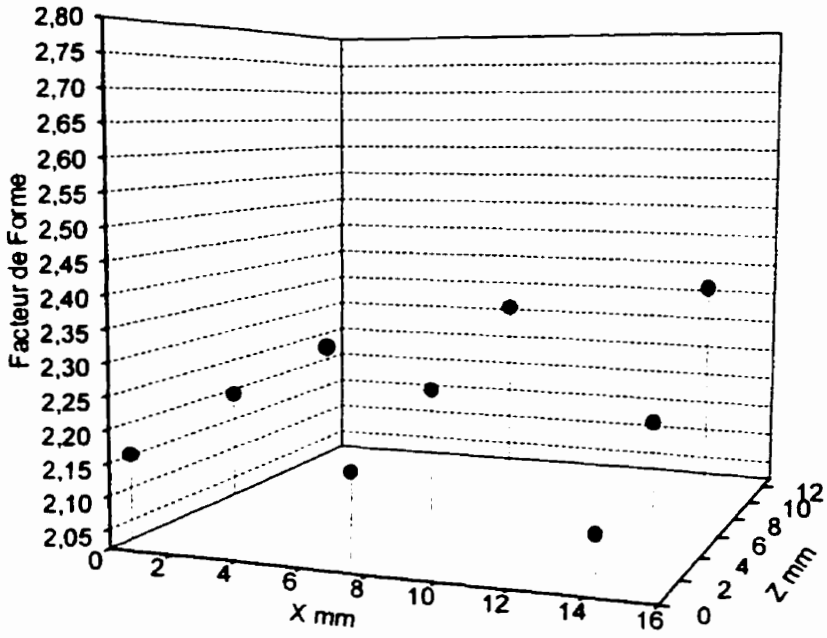


Échantillon 4

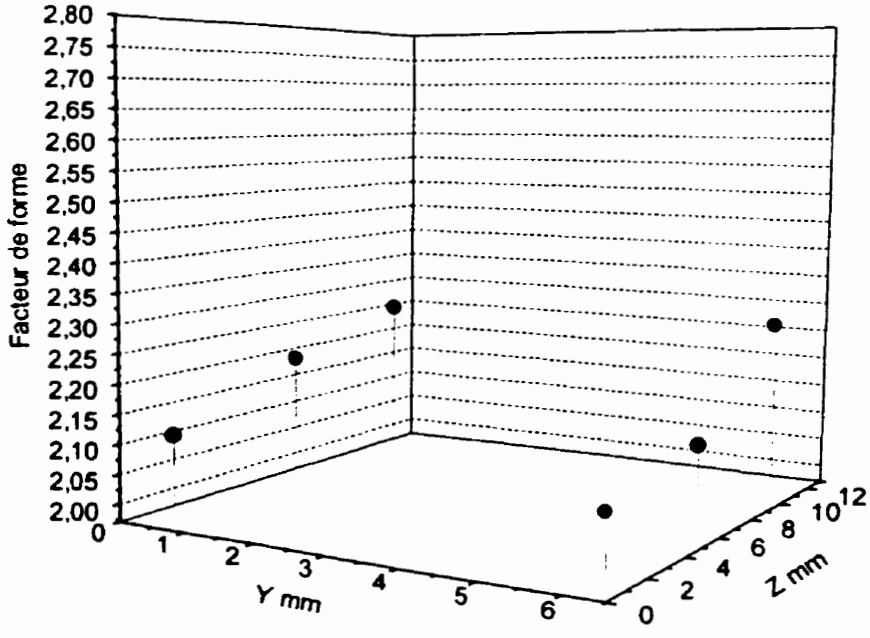


Échantillon 5

Pressage à 414 MPa (30 tsi) de poudre de classe 1 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 6) et section transversale (Échantillon 7).

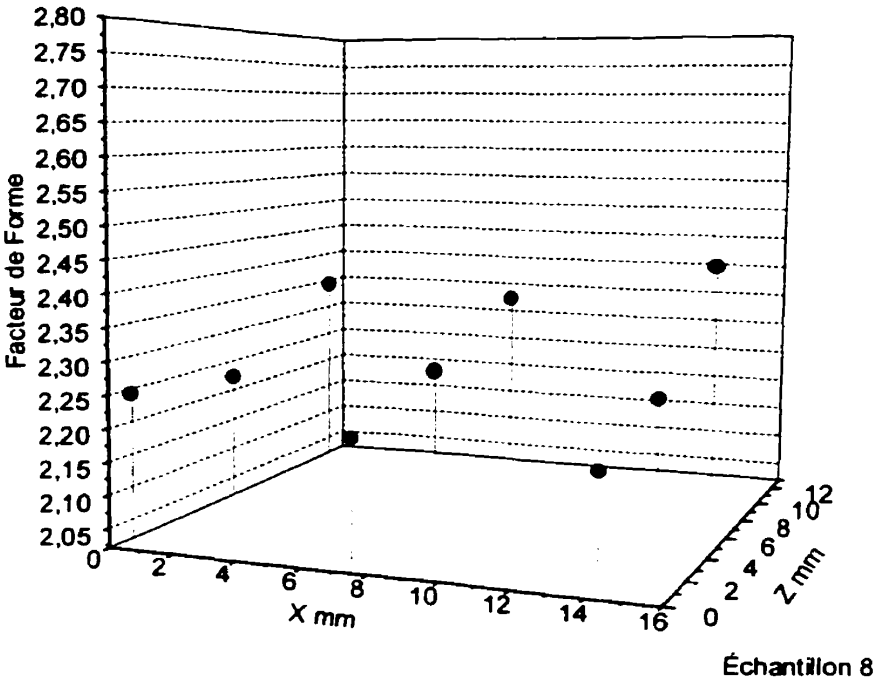


Échantillon 6

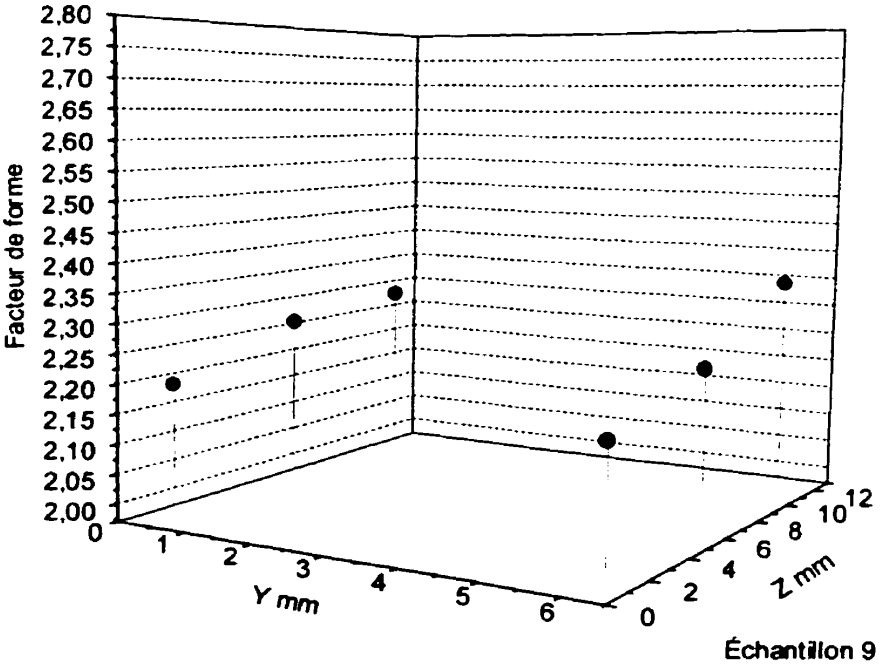


Échantillon 7

Pressage à 621 MPa (45 tsi) de poudre de classe 1 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 8) et section transversale (Échantillon 9).

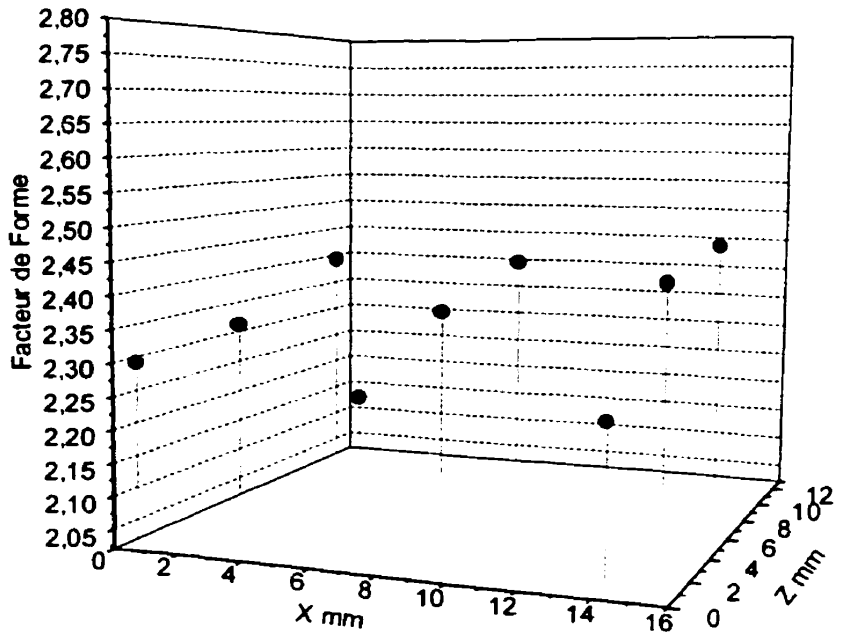


Échantillon 8

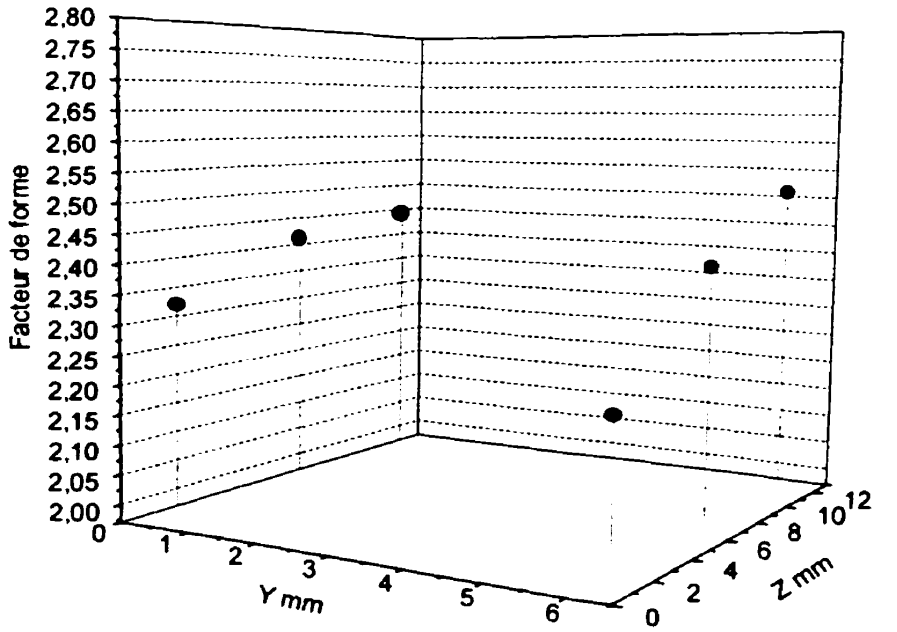


Échantillon 9

Pressage à 965 MPa (70 tsi) de poudre de classe 1 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 10) et section transversale (Échantillon 11).

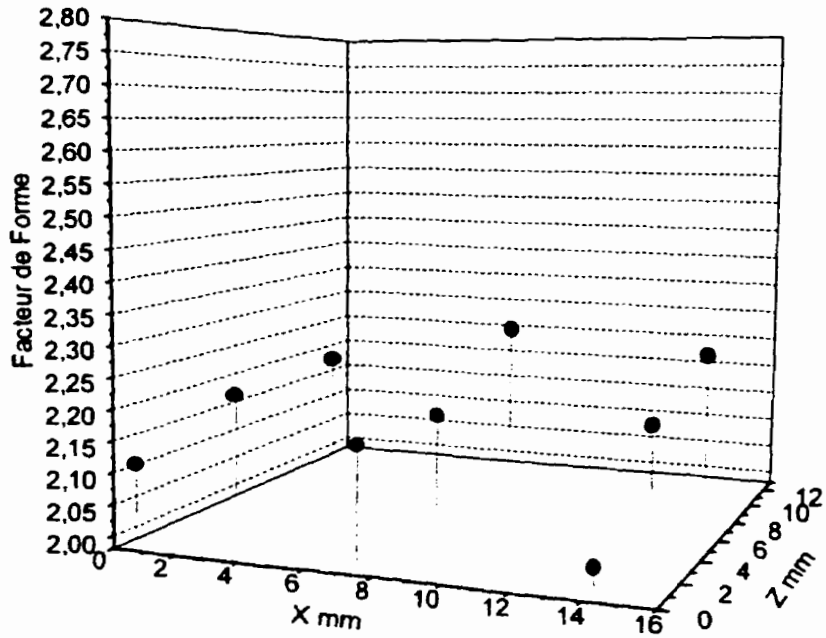


Échantillon 10

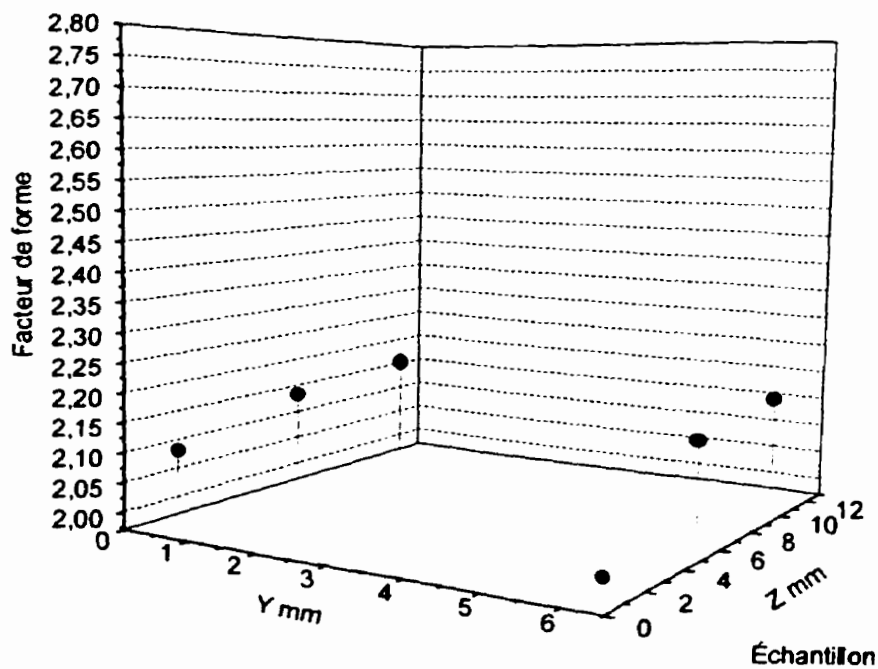


Échantillon 11

Pressage à 275 MPa (20 tsi) de poudre de classe 1 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 12) et section transversale (Échantillon 13).

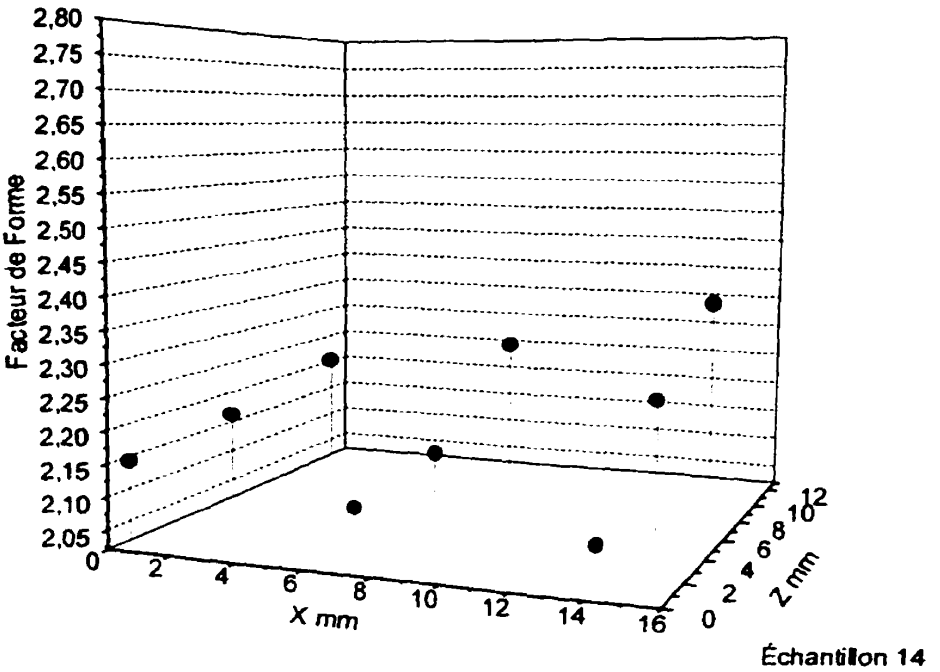


Échantillon 12

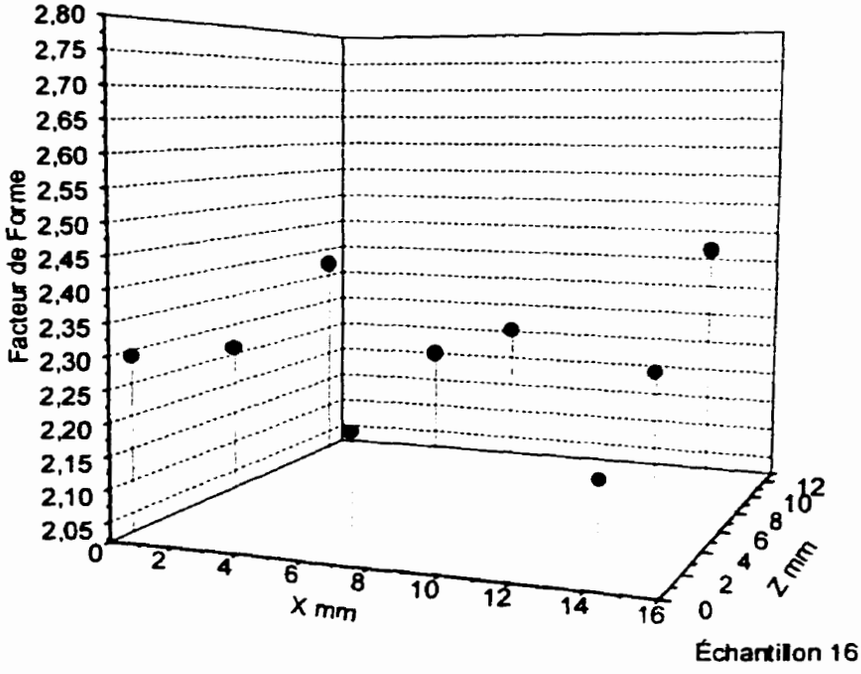


Échantillon 13

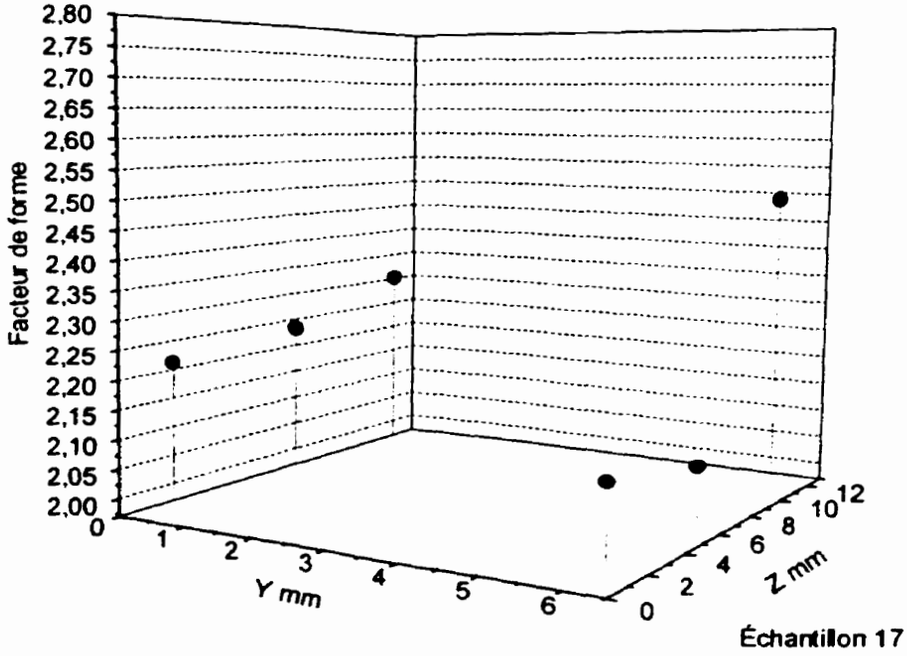
Pressage à 414 MPa (30 tsi) de poudre de classe 1 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 14).



Pressage à 621 MPa (45 tsi) de poudre de classe 1 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 16) et section transversale (Échantillon 17).

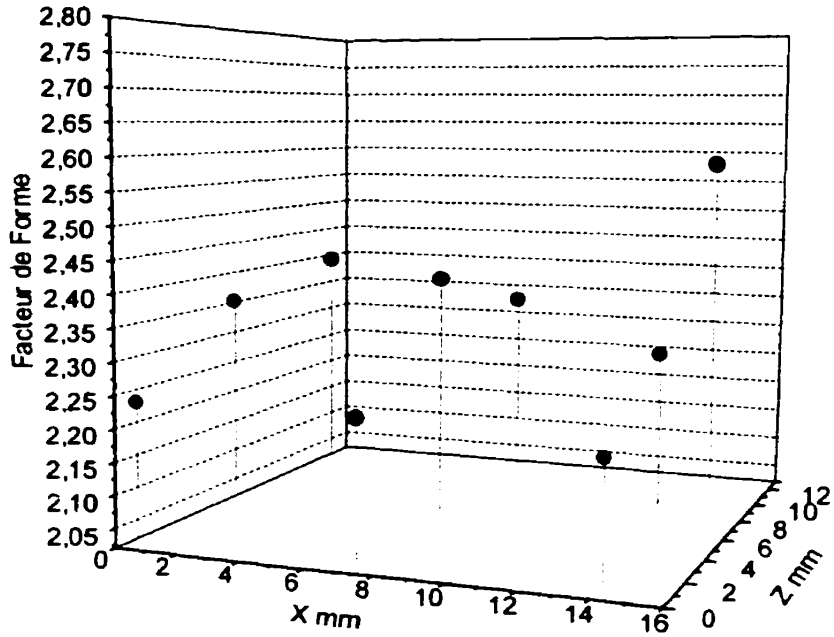


Échantillon 16

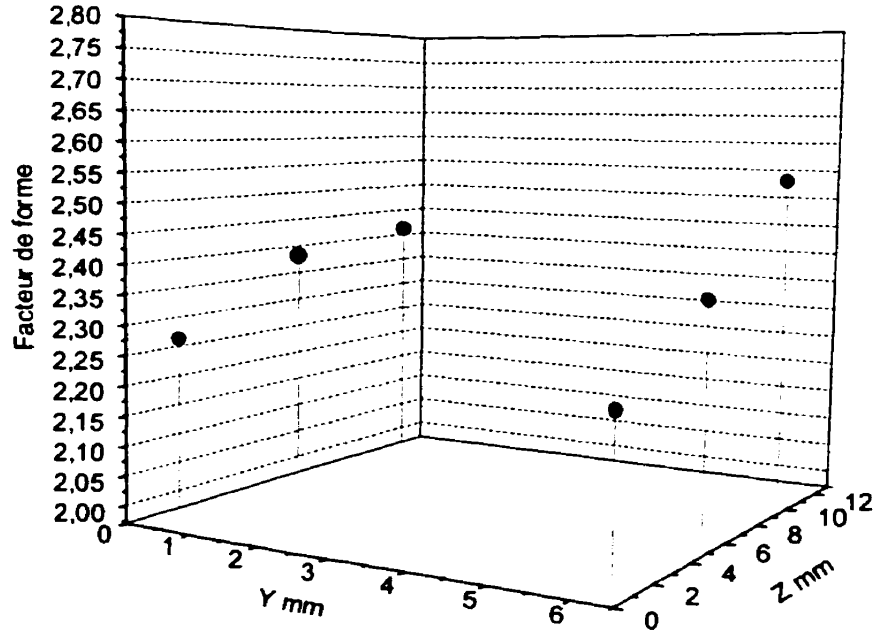


Échantillon 17

Pressage à 965 MPa (70 tsi) de poudre de classe 1 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 18) et section transversale (Échantillon 19).

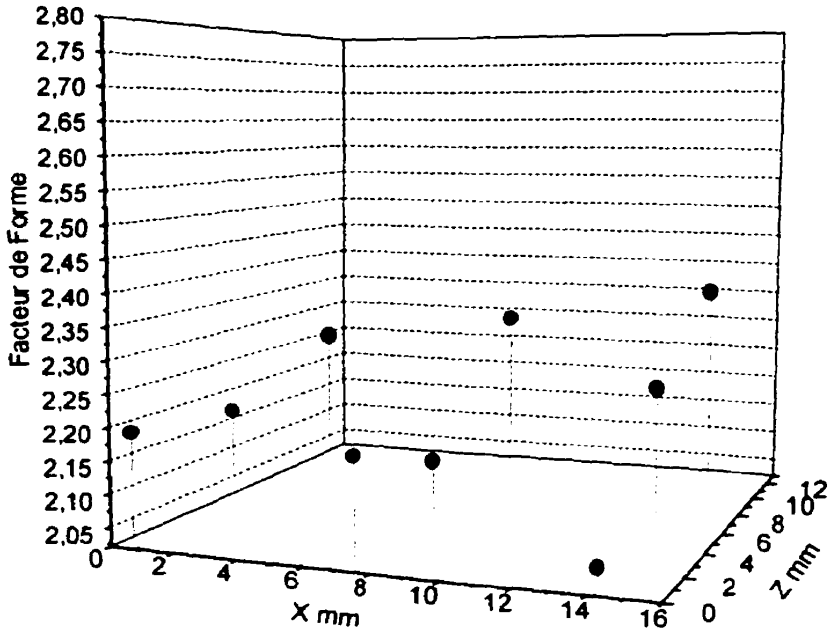


Échantillon 18

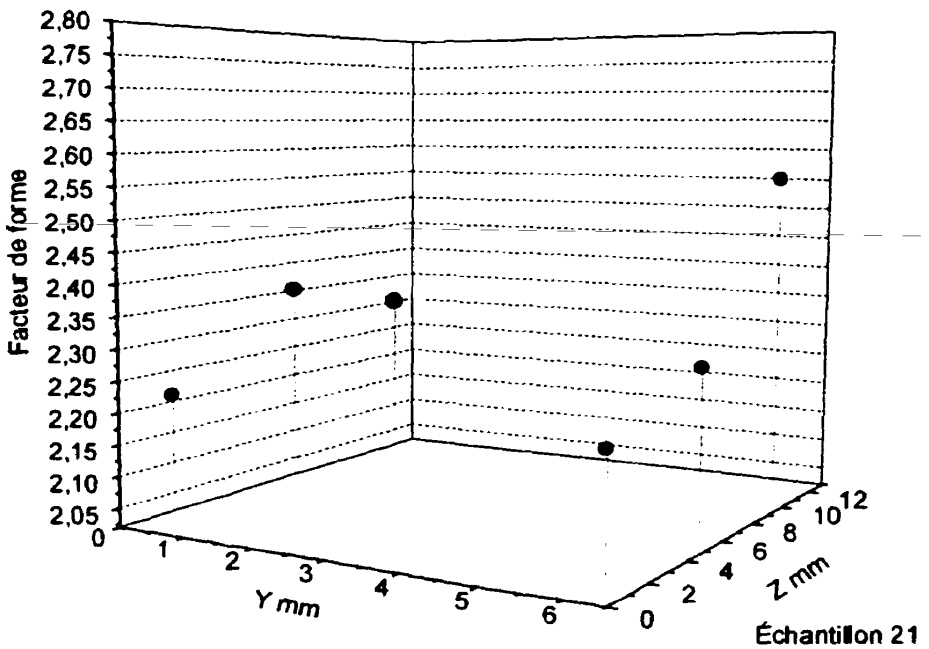


Échantillon 19

Pressage à 275 MPa (20 tsi) de poudre de classe 2 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 20) et section transversale (Échantillon 21).

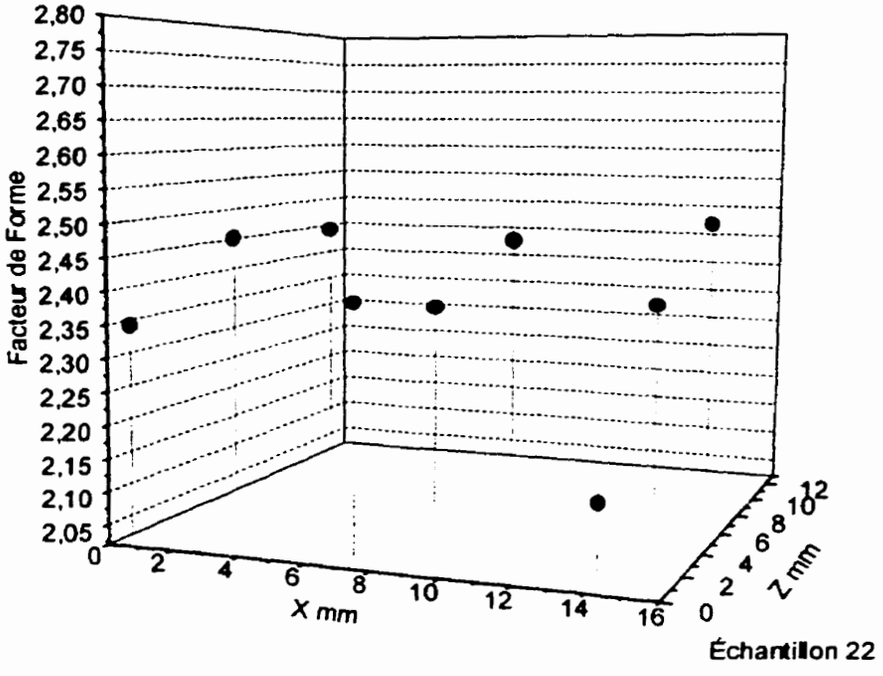


Échantillon 20

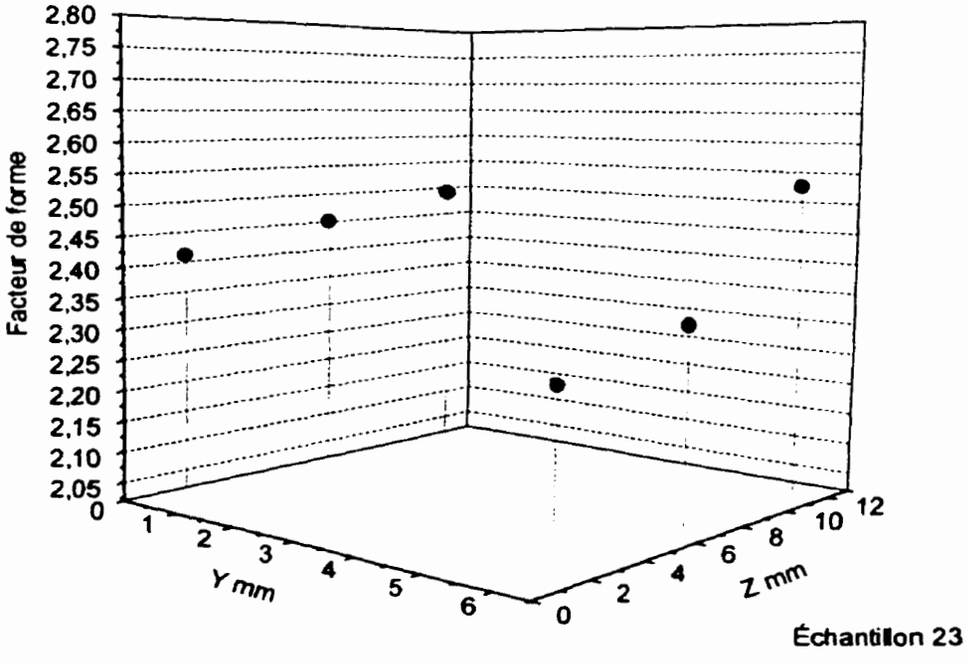


Échantillon 21

Pressage à 414 MPa (30 tsi) de poudre de classe 2 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 22) et section transversale (Échantillon 23).

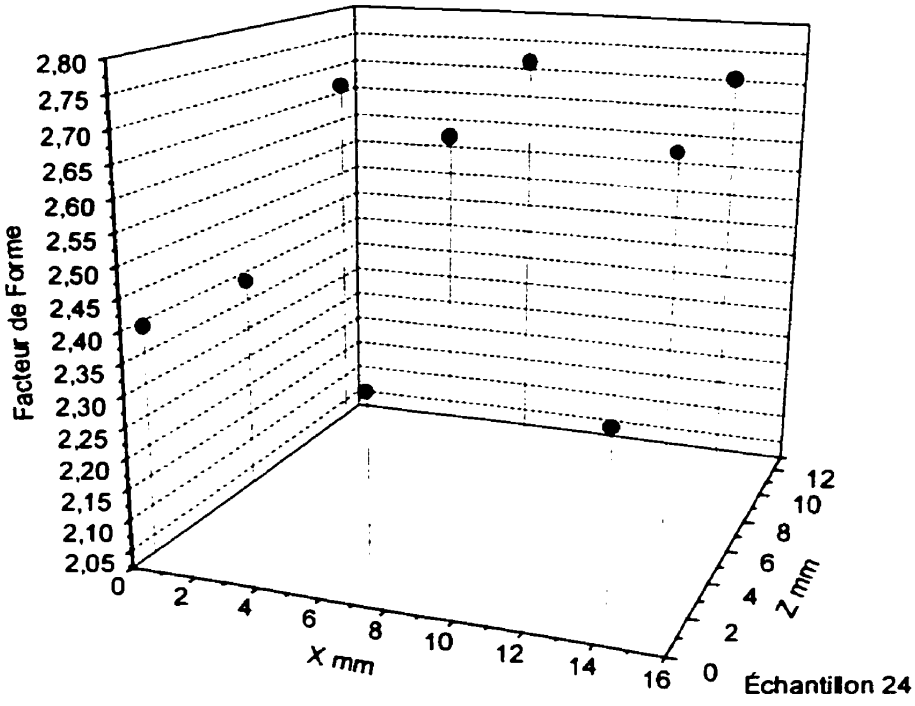


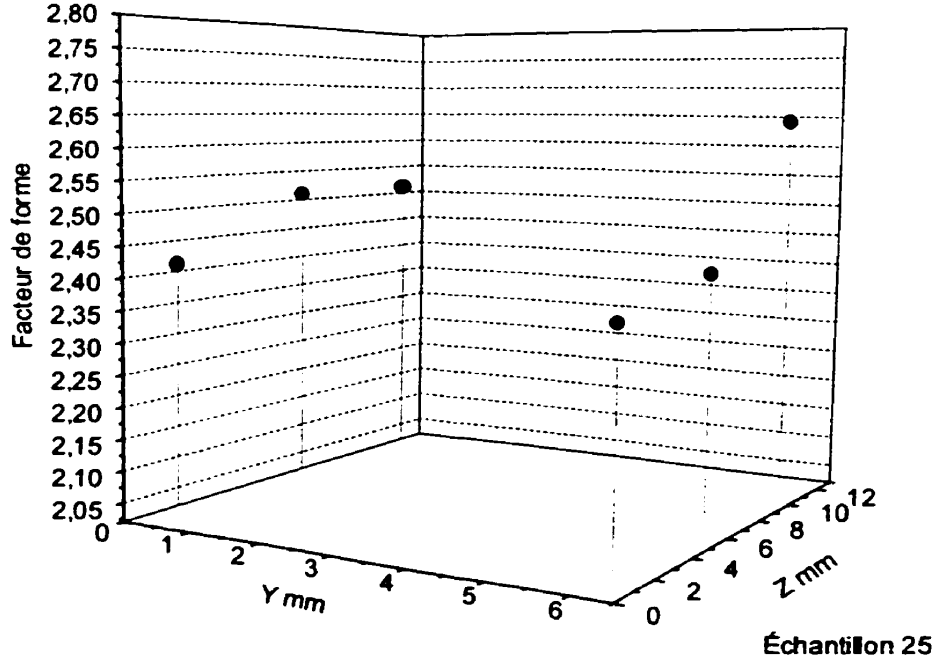
Échantillon 22



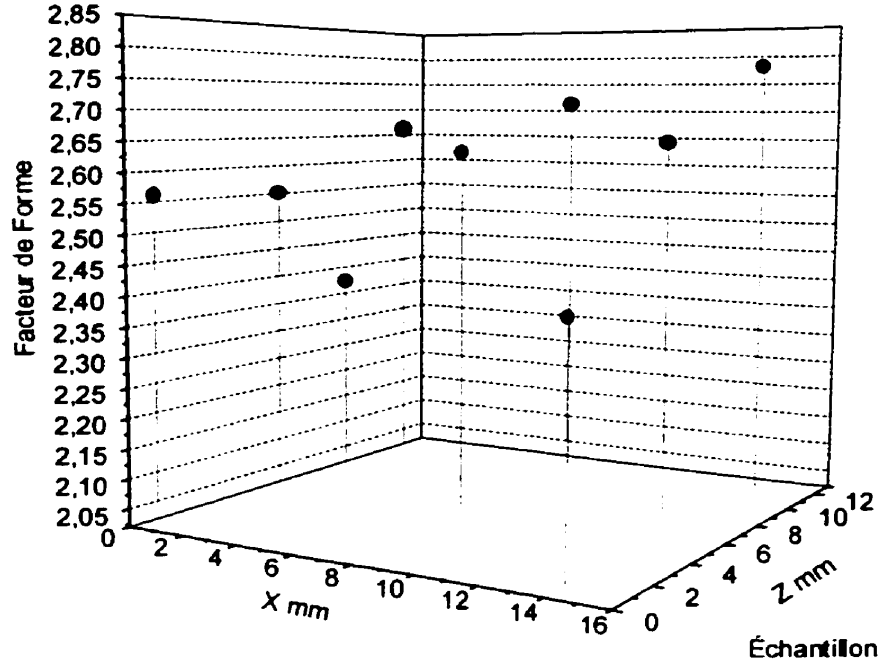
Échantillon 23

Pressage à 621 MPa (45 tsi) de poudre de classe 2 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 24) et section transversale (Échantillon 25).

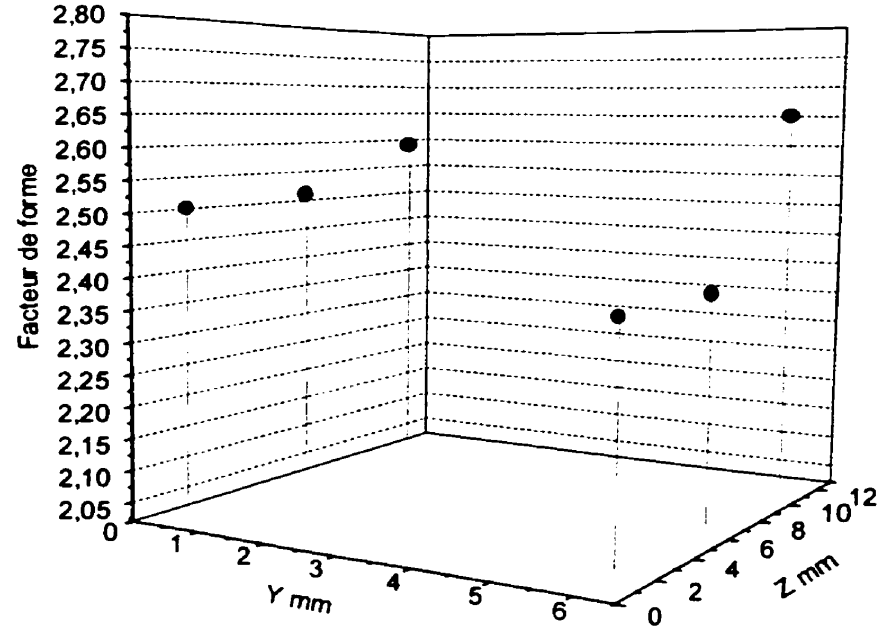




Pressage à 965 MPa (70 tsi) de poudre de classe 2 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 26) et section transversale (Échantillon 27).

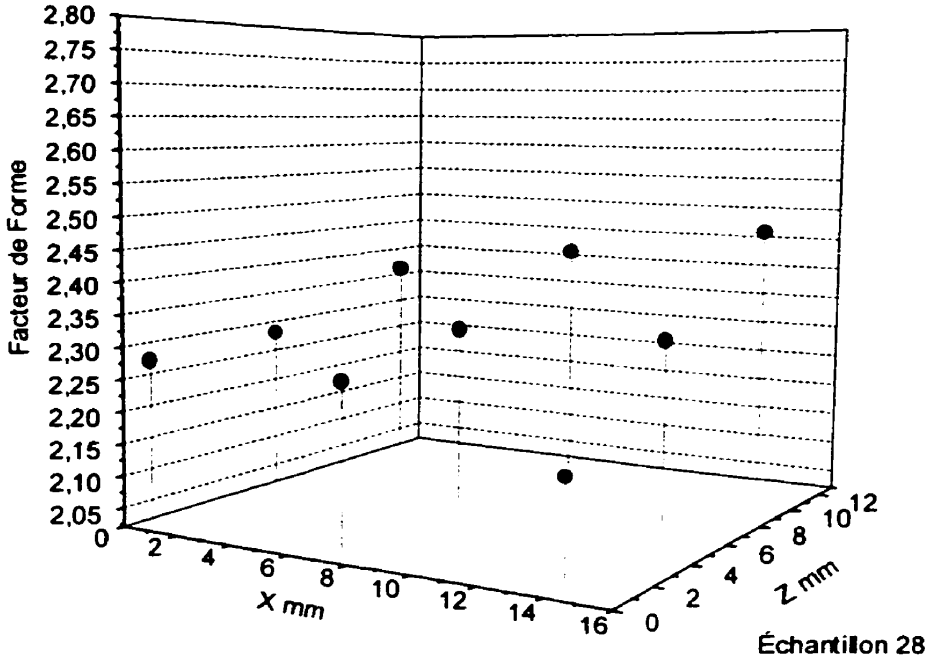


Échantillon 26

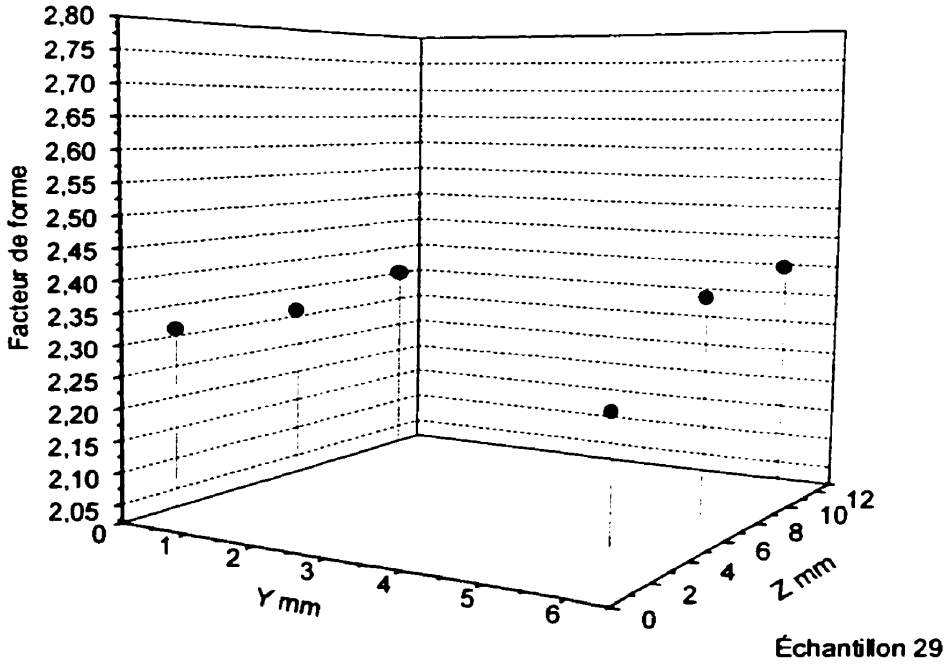


Échantillon 27

Pressage à 275 MPa (20 tsi) de poudre de classe 2 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 28) et section transversale (Échantillon 29).

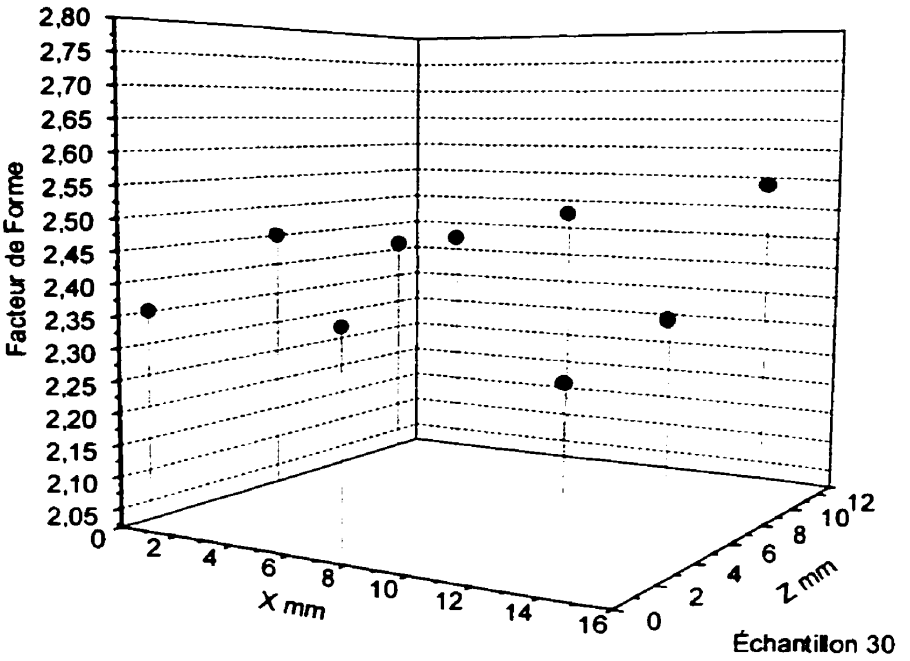


Échantillon 28

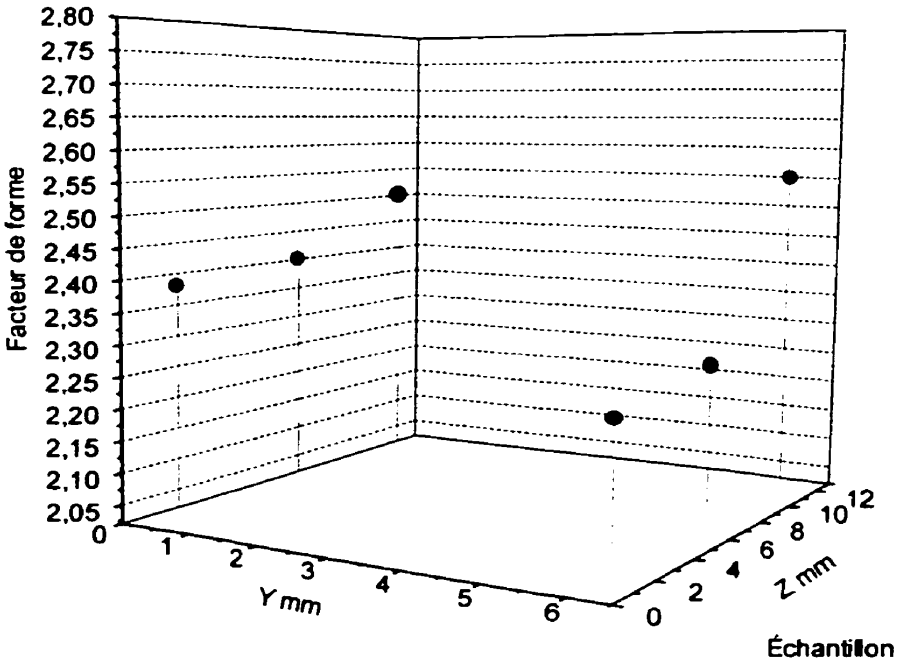


Échantillon 29

Pressage à 414 MPa (30 tsi) de poudre de classe 2 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 30) et section transversale (Échantillon 31).

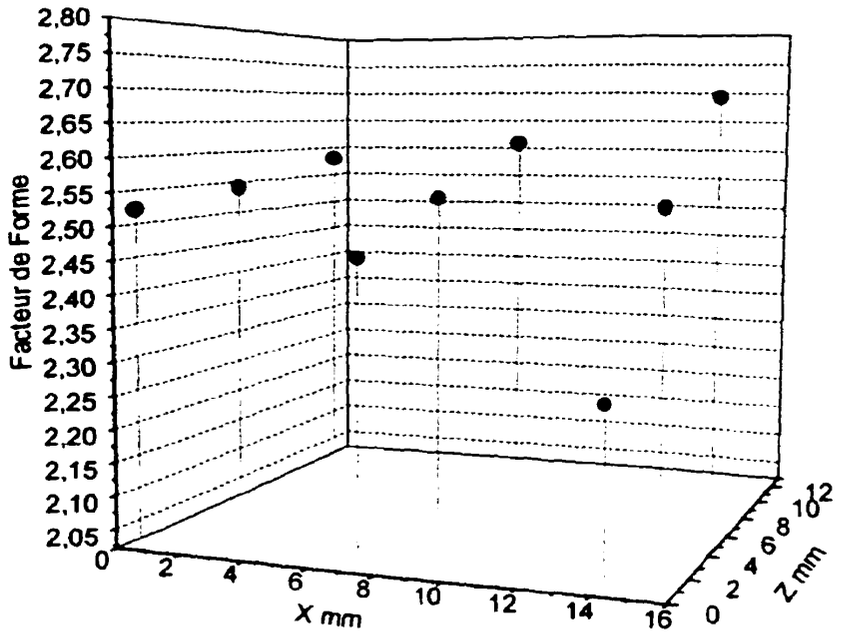


Échantillon 30

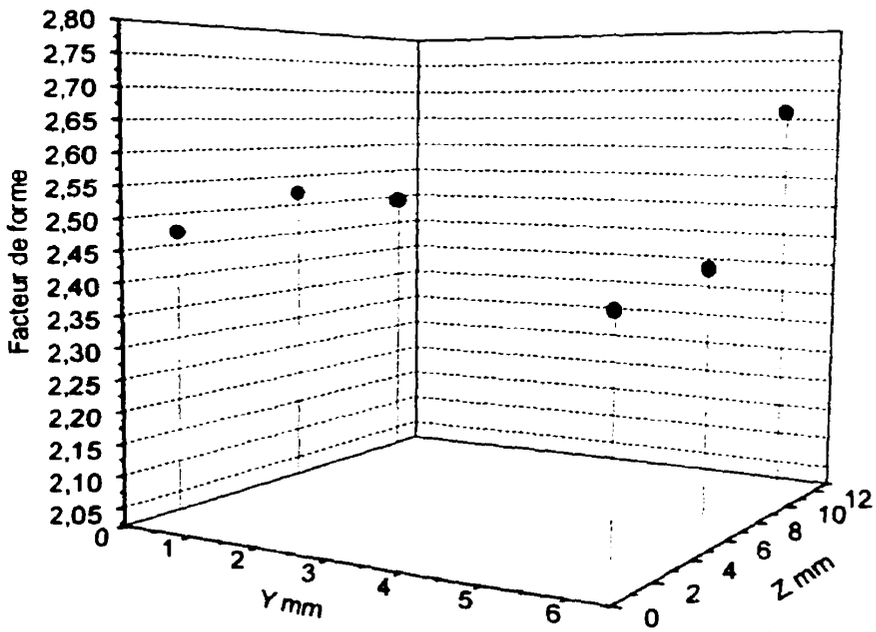


Échantillon 31

Pressage à 621 MPa (45 tsi) de poudre de classe 2 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 32) et section transversale (Échantillon 33).

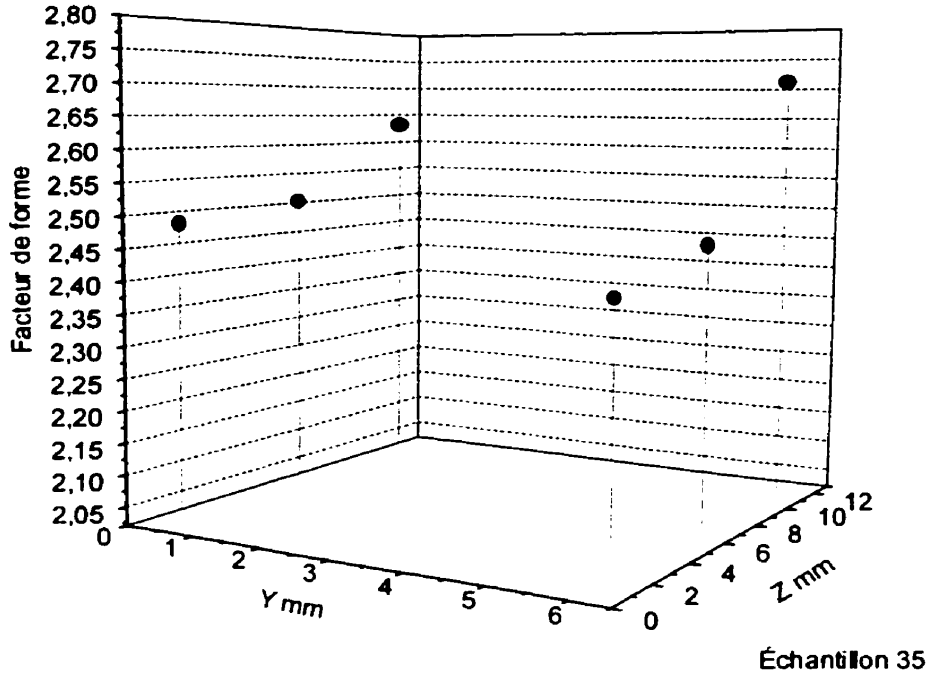


Échantillon 32

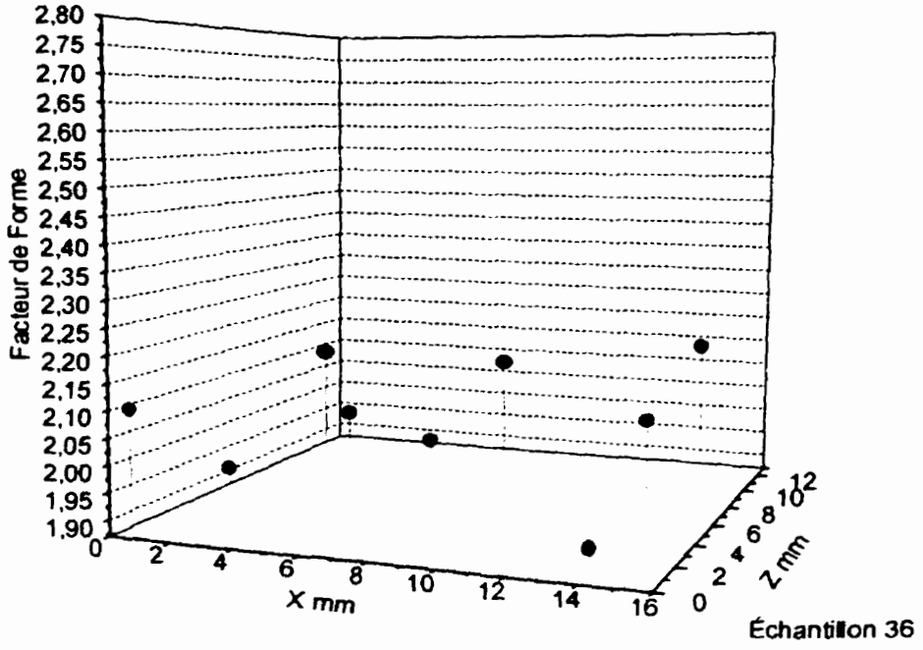


Échantillon 33

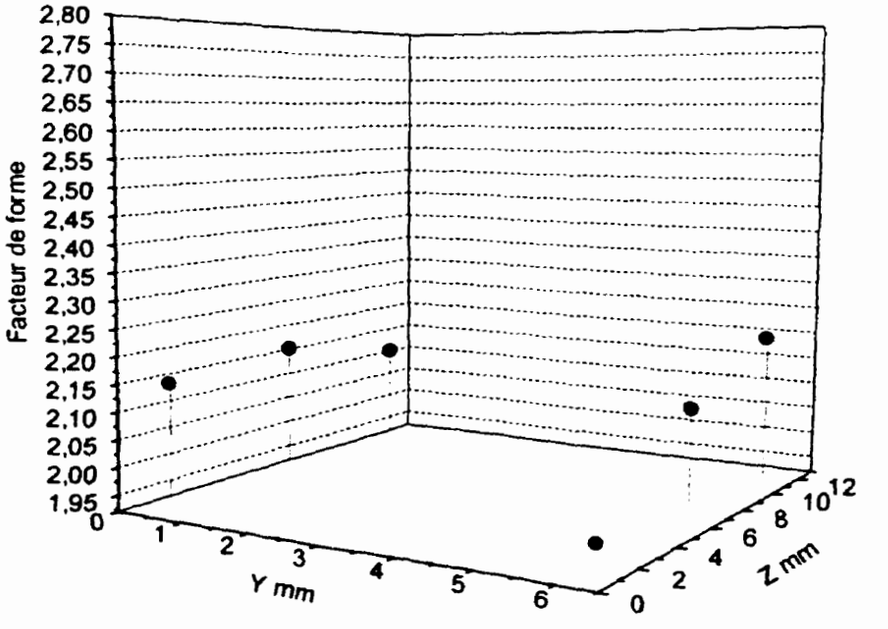
Pressage à 965 MPa (70 tsi) de poudre de classe 2 non-lubrifiée ; section transversale (Échantillon 35).



Pressage à 275 MPa (20 tsi) de poudre de classe 1+2 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 36) et section transversale (Échantillon 37).

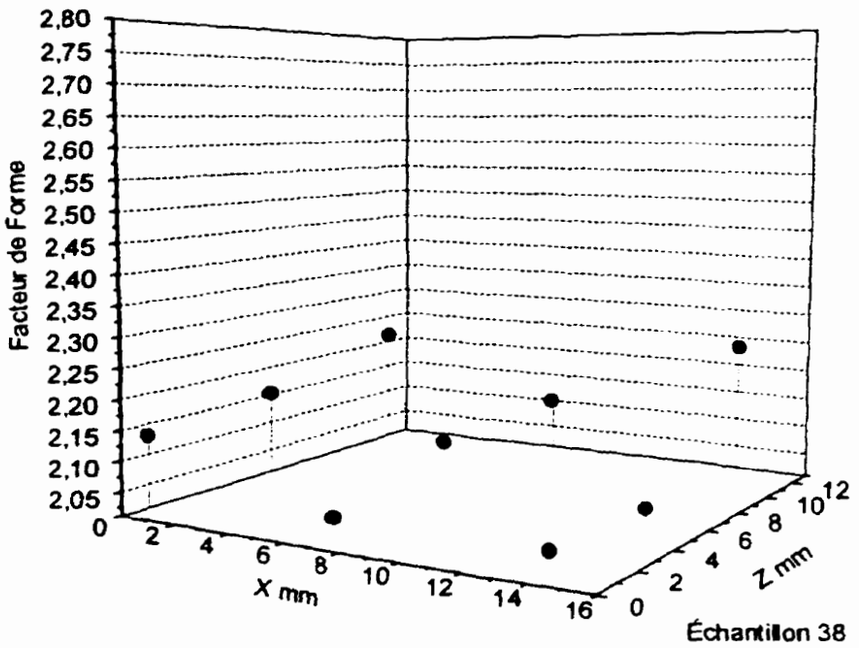


Échantillon 36

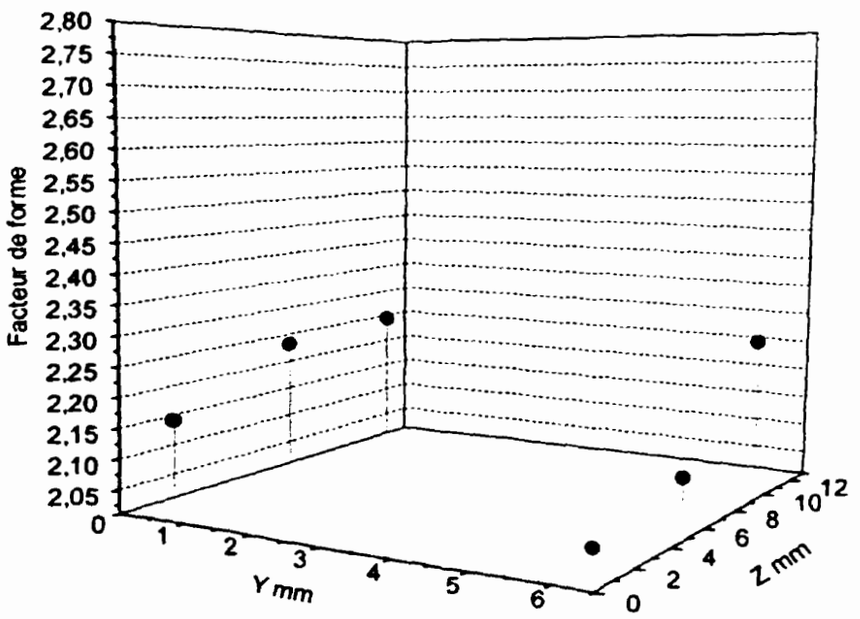


Échantillon 37

Pressage à 414 MPa (30 tsi) de poudre de classe 1+2 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 38) et section transversale (Échantillon 39).

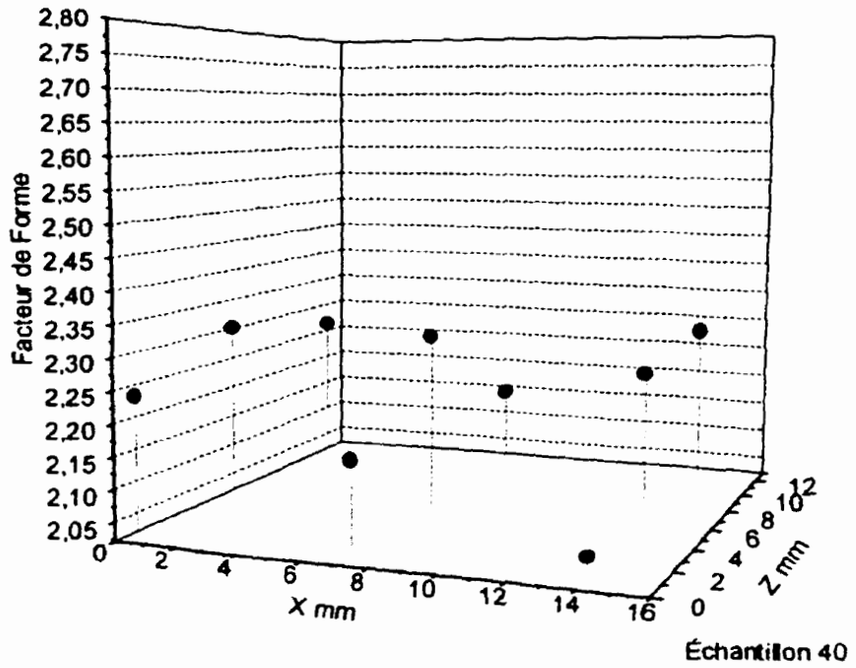


Échantillon 38

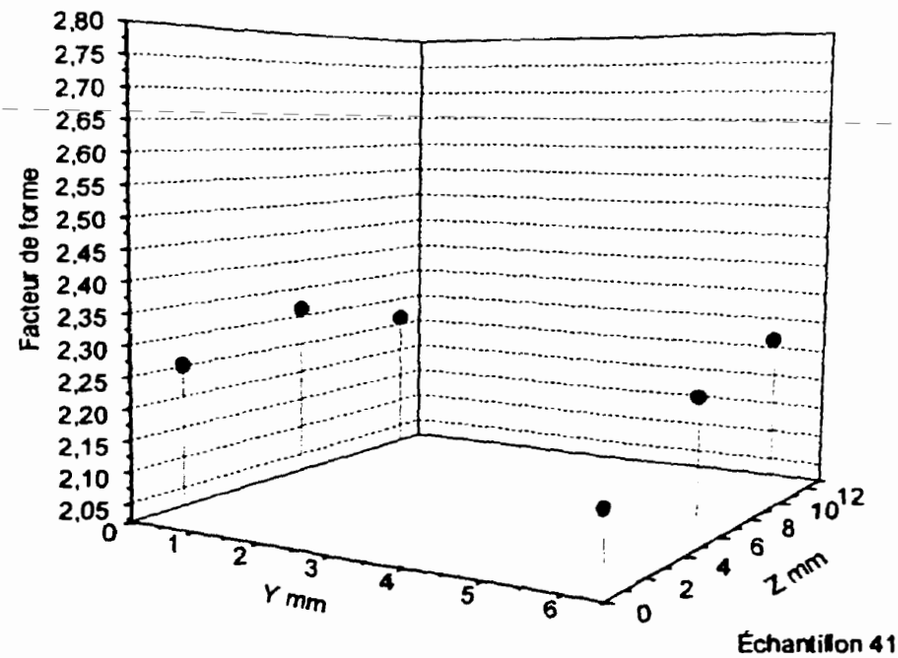


Échantillon 39

Pressage à 621 MPa (45 tsi) de poudre de classe 1+2 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 40) et section transversale (Échantillon 41).

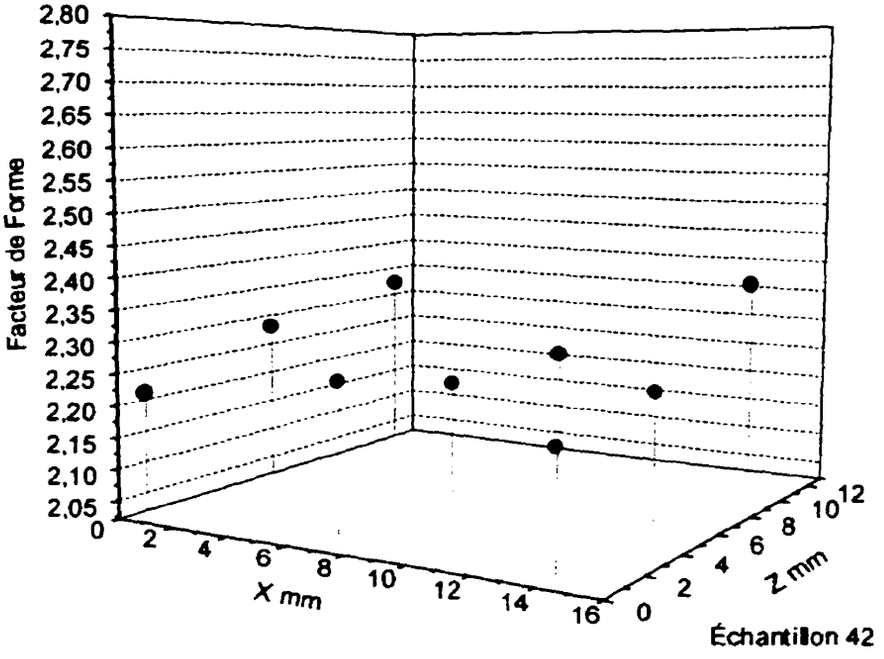


Échantillon 40

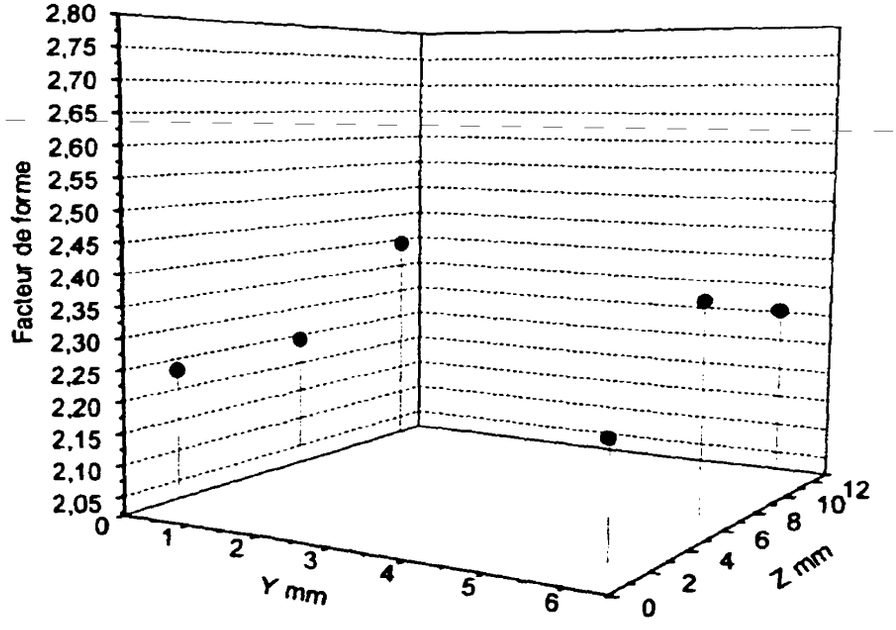


Échantillon 41

Pressage à 965 MPa (70 tsi) de poudre de classe 1+2 lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 42) et section transversale (Échantillon 43).

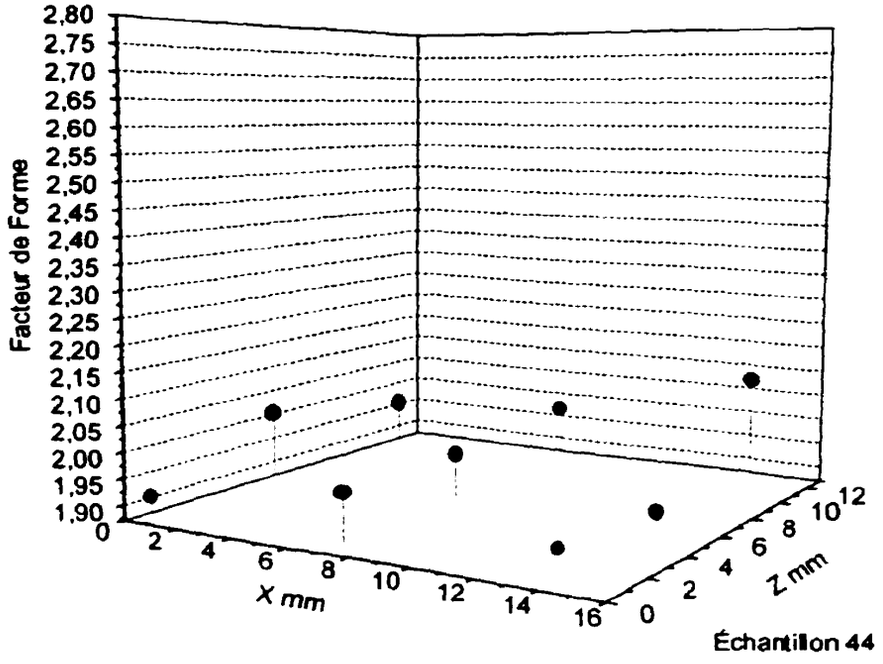


Échantillon 42

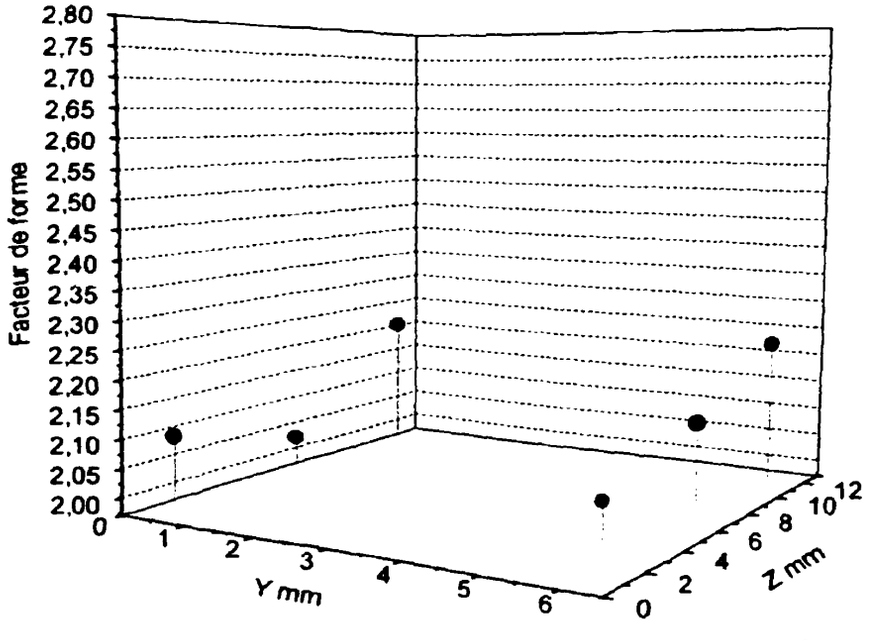


Échantillon 43

Pressage à 275 MPa (20 tsi) de poudre de classe 1+2 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 44) et section transversale (Échantillon 45).

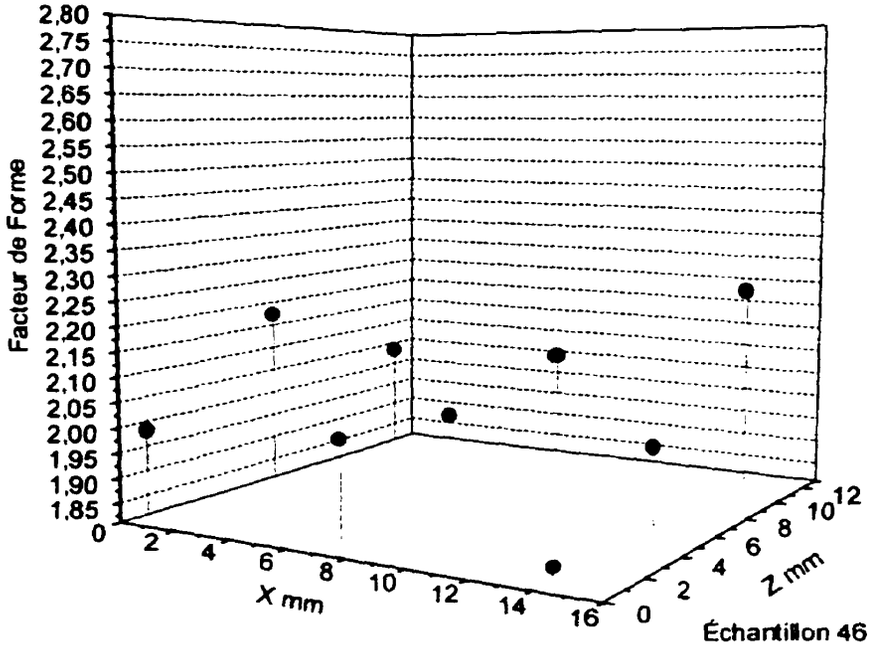


Échantillon 44

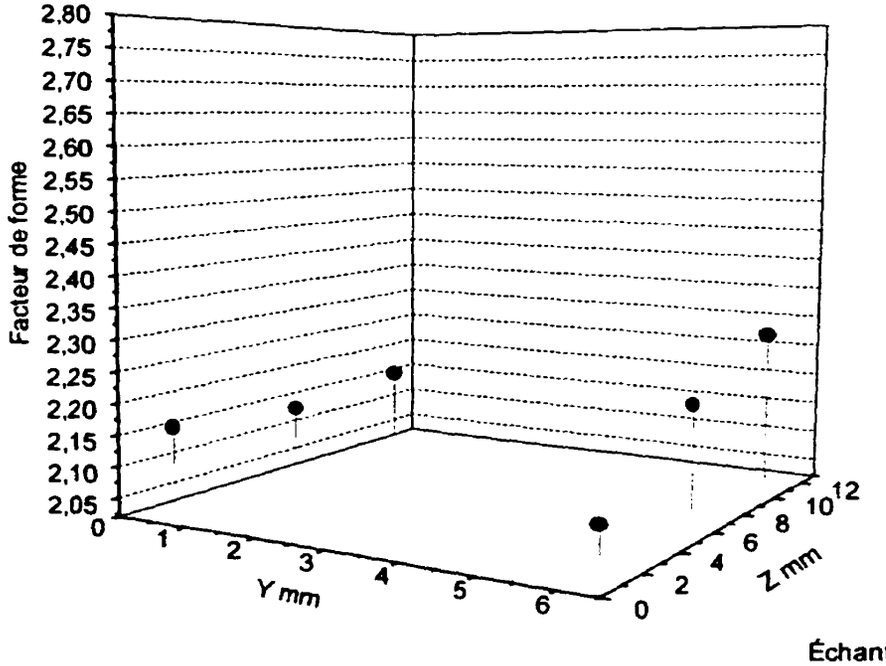


Échantillon 45

Pressage à 414 MPa (30 tsi) de poudre de classe 1+2 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 46) et section transversale (Échantillon 47).

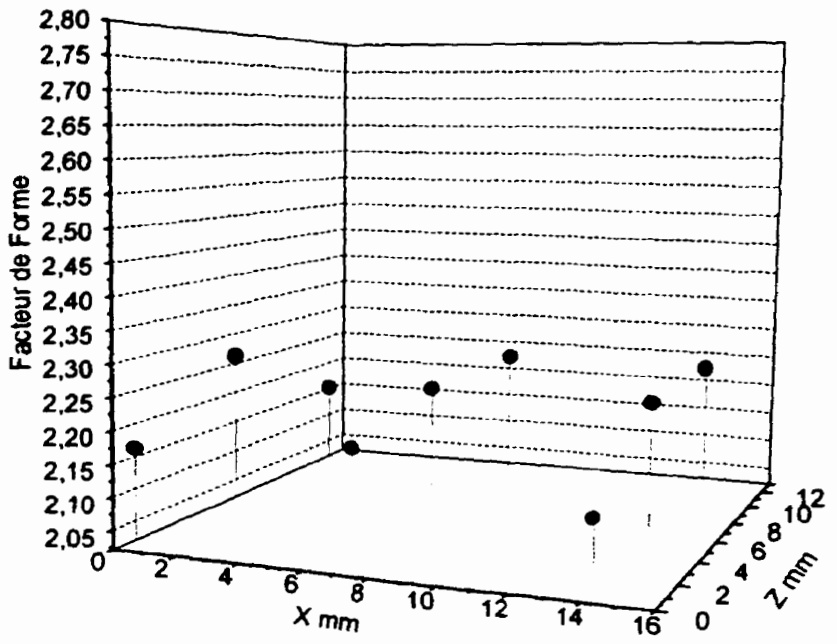


Échantillon 46

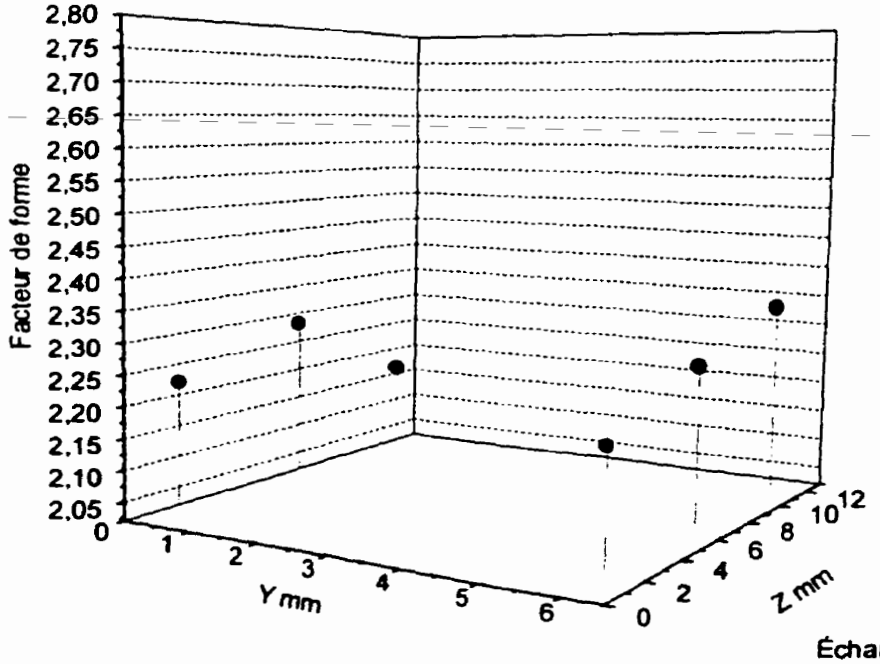


Échantillon 47

Pressage à 621 MPa (45 tsi) de poudre de classe 1+2 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 48) et section transversale (Échantillon 49).

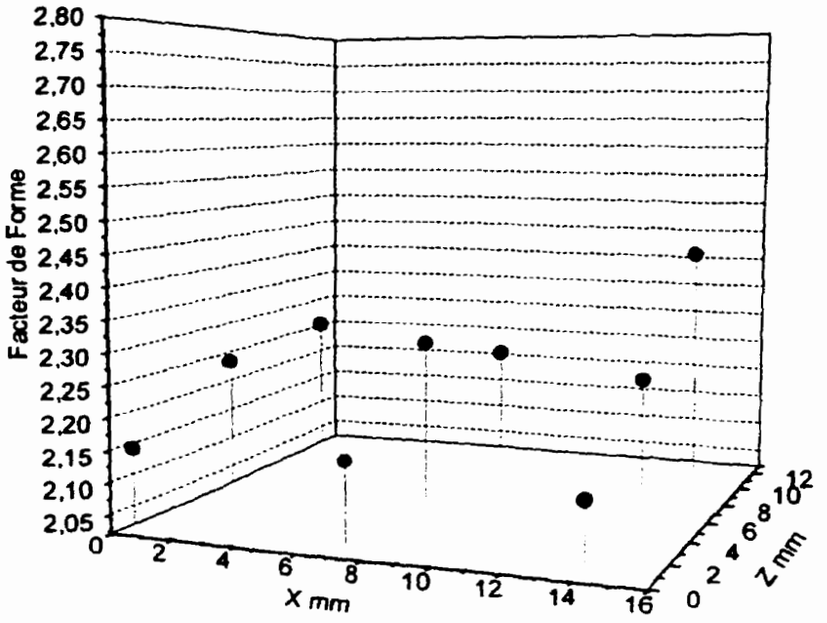


Échantillon 48

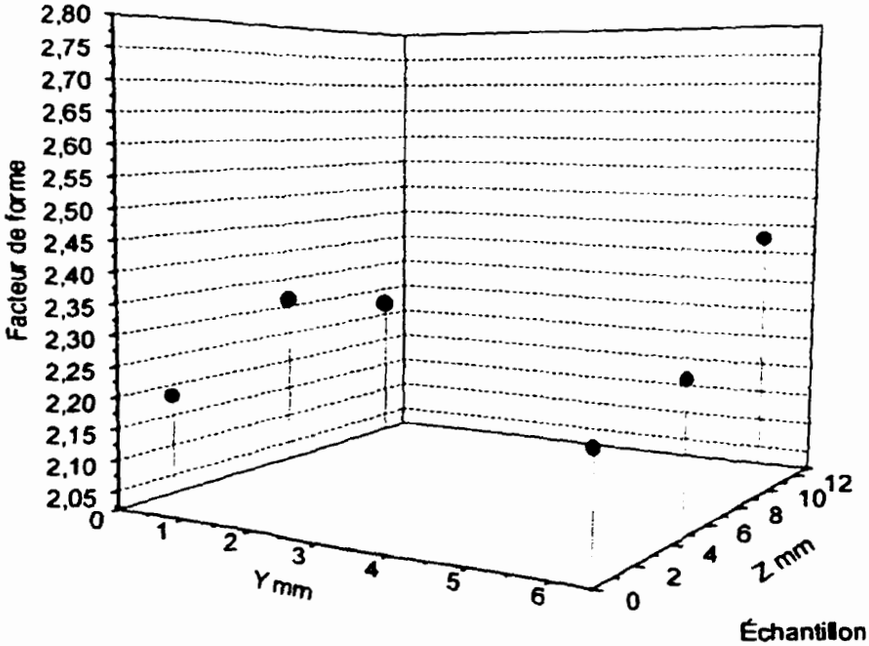


Échantillon 49

Pressage à 965 MPa (70 tsi) de poudre de classe 1+2 non-lubrifiée ; section longitudinale (Échantillon 50) et section transversale (Échantillon 51).



Échantillon 50



Échantillon 51

Annexe 6 : Calcul du facteur de forme des zones de référence des comprimés à vert

Tableau A.6.4. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 4.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	4.d50.a1	239,51	26,74	12,91	2,18
Écart		178,03	11,16	4,54	0,83
Moyenne	4.d50.a2	272,26	28,89	14,71	2,08
Écart		158,44	13,07	6,11	0,84
Moyenne	4.d50.a3	261,96	24,25	12,21	2,13
Écart		140,24	8,52	4,13	0,84
Moyenne	4.d50.b1	295,96	20,84	10,44	2,16
Écart		180,7	6,79	3,78	0,85
Moyenne	4.d50.b2	237,82	23,26	10,67	2,18
Écart		140,04	8,88	4,04	0,95
Moyenne	4.d50.c1	234,41	18,35	9,61	2,17
Écart		126,8	8,64	5,15	1,05
Moyenne	4.d50.c2	254,93	17,92	8,75	2,27
Écart		161,03	8,98	4,78	0,96
Moyenne	4.d50.c3	239,39	18,93	9,28	2,27
Écart		151,15	9,81	5,04	1,09
Moyenne	4.d50.d1	260,22	24,8	11,27	2,2
Écart		166,59	9,39	5,05	0,74
Moyenne	4.d50.d2	292,9	23,91	10,98	2,18
Écart		186,15	7,06	3,71	0,66
Moyenne	4.d50.e1	234,46	24,69	11,27	2,19
Écart		144,48	9,08	3,65	0,95
Moyenne	4.d50.e2	265,51	21,68	10,76	2,15
Écart		137,34	6,55	3,24	0,83
Moyenne	4.d50.e3	255,79	22,85	11,1	2,18
Écart		186,71	7,85	3,01	0,89
Moyenne	4.d50.f2	288,59	17,31	9,28	2,1
Écart		166,1	8,16	4,94	0,96
Moyenne	4.d50.f3	248,83	24,73	12,64	2,1
Écart		140,49	8,5	4,58	0,86
Moyenne	4.d50.g1	235,17	24,71	11,99	2,06
Écart		172,36	9,51	5,51	0,74
Moyenne	4.d50.g2	264,41	28,37	1,84	2,05
Écart		188,88	13,32	5,48	0,77
Moyenne	4.d50.g3	249,86	26,48	13,87	2,04
Écart		183,68	10,83	5,91	0,66
Moyenne	4.d50.h1	231,77	24,07	12,52	2,08
Écart		116,98	7,23	3,89	0,88
Moyenne	4.d50.h2	240,83	26,97	12,72	2,12
Écart		181,41	14,46	5,34	0,75
Moyenne	4.d50.h3	263,31	29,81	14,19	2,1
Écart		216,84	13,85	7,45	0,74
Moyenne	4.d50.i1	253,87	23,86	11,54	2,23
Écart		142,94	8,46	4,19	0,92
Moyenne	4.d50.i2	260,1	23,6	10,73	2,2
Écart		160,99	5,83	2,74	0,82
Moyenne	4.d50.i3	287,43	23,95	11,63	2,22
Écart		147,6	7,98	3,91	0,95

Tableau A.6.5. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 5.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	5.d50.a2	289,43	21,4	11,25	2,1
Écart		138,29	7,84	4,74	0,89
Moyenne	5.d50.a1	294,72	21,97	10,46	2,1
Écart		133,16	7,89	4,39	0,87
Moyenne	5.d50.b1	247,12	19,63	9,65	2,2
Écart		136,47	7,33	3,94	0,8
Moyenne	5.d50.b2	227,89	20,95	10,98	2,12
Écart		122,64	6,56	4,54	0,91
Moyenne	5.d50.c1	283,43	18,65	9,22	2,27
Écart		162,7	5,97	3,65	0,99
Moyenne	5.d50.c2	290,77	21,58	11,05	2,2
Écart		122	7,35	4,97	0,96
Moyenne	5.d50.d1	278,08	18,47	8,53	2,4
Écart		189,64	5,95	3,57	0,99
Moyenne	5.d50.d2	213,27	20,21	10,22	2,24
Écart		155,56	6,57	4,28	1,14
Moyenne	5.d50.e1	265,01	21,87	11,09	2,2
Écart		108,8	11,66	7,79	0,83
Moyenne	5.d50.e2	238,96	21,49	11,57	2
Écart		118,79	8,32	4,82	0,73
Moyenne	5.d50.f3	280,73	20,83	11,14	2,14
Écart		172,59	6,25	4,63	1,01
Moyenne	5.d50.f2	239,32	19,96	10,76	2,06
Écart		160,69	6,11	4,14	1,04
Moyenne	5.d50.f1	274,6	20,89	11,41	1,99
Écart		154,51	9,05	5,49	0,71

Tableau A.6.6. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 6.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	6.d50.a1	249,44	26,81	12,53	2,14
Écart		164,42	10,63	5,83	0,97
Moyenne	6.d50.a2	221,42	24,54	11,36	2,16
Écart		135,22	9,13	4,68	0,93
Moyenne	6.d50.b1	256,26	22,99	10,55	2,18
Écart		147,52	9,94	5,47	0,87
Moyenne	6.d50.b2	232,57	24,9	11,31	2,2
Écart		123,84	8,68	5,01	0,88
Moyenne	6.d50.c1	254,46	30,25	13,95	2,24
Écart		176,34	19,73	7,03	0,91
Moyenne	6.d50.c2	227,46	24,16	10,98	2,2
Écart		134,65	10,15	4,73	0,83
Moyenne	6.d50.d1	244,44	22,64	9,8	2,31
Écart		130,85	9,16	3,77	1,21
Moyenne	6.d50.d2	262,57	23,93	10,36	2,31
Écart		146,31	8,48	4,09	1,09
Moyenne	6.d50.e1	245,87	23,95	10,74	2,23
Écart		176,35	9,33	4,16	0,9
Moyenne	6.d50.e2	237,76	22,67	10,26	2,21
Écart		180,24	8,23	3,98	0,91
Moyenne	6.d50.f1	248,2	24,91	11,17	2,23
Écart		152,88	10,25	4,72	0,98
Moyenne	6.d50.f2	251,47	22,93	10,92	2,1
Écart		147,21	10,15	4,72	0,83
Moyenne	6.d50.f3	226,44	23,18	10,88	2,13
Écart		151,5	9,72	5,59	0,99
Moyenne	6.d50.g1	234,06	23,4	11,76	1,99
Écart		129,78	9,11	5,33	0,84
Moyenne	6.d50.g2	246,71	25,15	11,59	2,17
Écart		145,53	10,35	5,31	0,79
Moyenne	6.d50.g3	239,24	23,18	11,91	2,11
Écart		168,8	10,6	5,14	0,88
Moyenne	6.d50.h1	254,59	22,74	10,48	2,17
Écart		168,97	10,57	4,86	0,82
Moyenne	6.d50.h2	249,17	21,76	9,85	2,21
Écart		154,31	8,76	4,84	1,37
Moyenne	6.d50.i1	265,93	29,19	12,37	2,36
Écart		206,14	13,39	6,74	1,31
Moyenne	6.d50.i2	256,08	29,06	12,26	2,37
Écart		187,36	12,7	5,1	0,93

Tableau A.6.7. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 7.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	7.d50.a1	262,24	25,34	12,83	2,09
Écart		160,46	13,67	6,12	0,83
Moyenne	7.d50.a2	249,88	26,02	13,44	2,09
Écart		184,16	11,87	7,2	0,72
Moyenne	7.d50.b1	296,02	23,85	11,94	2,12
Écart		125,01	8,94	4,47	0,73
Moyenne	7.d50.b2	236,6	24,39	11,78	2,23
Écart		128,78	9,58	4,45	0,86
Moyenne	7.d50.c1	271,13	29,26	13,48	2,24
Écart		198,19	17,96	6,65	0,82
Moyenne	7.d50.d1	235,44	24,76	11,75	2,26
Écart		151,49	12,24	5,66	0,78
Moyenne	7.d50.e1	239,15	26,14	13,57	2,1
Écart		142	9,87	5,3	0,88
Moyenne	7.d50.f1	254,14	25,96	13,97	2,07
Écart		179,92	14,05	10,69	0,72
Moyenne	7.d50.f2	274,66	22,68	11,92	2,05
Écart		138,91	8,7	5,12	0,72

Tableau A.6.8. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 8.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	8.d50.a1	277,19	28,83	13,8	2,19
Écart		157,13	11,29	4,72	0,75
Moyenne	8.d50.a2	232,29	28,38	12,96	2,19
Écart		149,96	9,62	4,68	0,85
Moyenne	8.d50.a3	252,57	21,86	10,36	2,33
Écart		156,31	8,48	4,09	1,09
Moyenne	8.d50.b1	264,16	24,34	11,16	2,18
Écart		143,69	8	3,49	0,73
Moyenne	8.d50.b2	242,54	28,82	12,81	2,25
Écart		133,14	8,92	3,92	0,76
Moyenne	8.d50.b3	236,72	24,06	10,79	2,23
Écart		109,16	6,45	4,71	0,84
Moyenne	8.d50.c1	246,25	25,61	10,85	2,36
Écart		175,6	6,78	2,99	0,74
Moyenne	8.d50.c2	260,27	24,69	11,34	2,32
Écart		150,31	7,25	3,29	0,83
Moyenne	8.d50.d1	267,31	26,29	11,43	2,3
Écart		146,51	8,11	3,72	0,77
Moyenne	8.d50.d2	235,66	27,36	12,28	2,35
Écart		143,22	9,43	4,07	0,87
Moyenne	8.d50.e1	262,38	28,37	13,61	2,25
Écart		149,95	10,58	4,87	0,92
Moyenne	8.d50.e2	254,4	25,91	11,51	2,25
Écart		148,4	8,73	4,53	0,94
Moyenne	8.d50.f1	237,04	25,62	12,81	2,12
Écart		143,18	7,5	3,92	0,75
Moyenne	8.d50.f2	231,57	26,89	12,61	2,28
Écart		137,91	8,35	4,12	0,87
Moyenne	8.d50.g1	246,71	23,46	11,59	2,16
Écart		145,53	10,35	5,31	0,79
Moyenne	8.d50.g2	233,19	25,03	12,33	2,19
Écart		110,83	8,15	4,07	0,89
Moyenne	8.d50.h1	260,19	24,41	11,76	2,23
Écart		132,44	8,67	3,98	0,92
Moyenne	8.d50.h2	296,28	23,97	11,65	2,23
Écart		156,74	6,87	3,69	0,88
Moyenne	8.d50.i1	274,62	25,16	11,05	2,43
Écart		178,66	7,13	3,2	0,89
Moyenne	8.d50.i2	264,29	31,97	13,49	2,37
Écart		163,97	10,2	5,86	0,98

Tableau A.6.9. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 9.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	9.d50.a1	243,21	26,22	13,16	2,14
Écart		160,11	12,13	6,39	0,87
Moyenne	9.d50.a2	272,97	28,28	13,47	2,24
Écart		165,23	16,54	6,71	0,99
Moyenne	9.d50.b1	226,98	25,96	12,11	2,23
Écart		151,43	14,97	5,82	0,87
Moyenne	9.d50.b2	295,70	23,43	11,31	2,24
Écart		156,07	10,15	4,95	0,88
Moyenne	9.d50.b3	280,34	22,97	11,11	2,27
Écart		162,69	9,02	4,71	0,97
Moyenne	9.d50.c1	246,72	26,44	13,04	2,2
Écart		189,99	11,74	6,1	0,84
Moyenne	9.d50.c2	258,08	28,86	12,96	2,36
Écart		212,06	15,02	6,05	0,97
Moyenne	9.d50.c3	220,45	25,09	12,18	2,25
Écart		199,29	12,56	5,86	0,98
Moyenne	9.d50.d1	240,82	23,86	10,85	2,38
Écart		115,64	9,75	4,4	1,1
Moyenne	9.d50.d2	246,2	23,46	10,95	2,29
Écart		154,74	11,96	4,64	0,95
Moyenne	9.d50.e1	212,18	22,81	11,1	2,2
Écart		124,53	9,99	4,62	0,91
Moyenne	9.d50.e2	235,94	22,25	11,34	2,2
Écart		120,58	7,59	4,96	0,94
Moyenne	9.d50.e3	232,47	26,28	12,42	2,29
Écart		185,88	12,96	6,24	0,95
Moyenne	9.d50.f1	234,87	23,66	11,47	2,27
Écart		162,74	9,3	5,31	0,86
Moyenne	9.d50.f2	285,7	20,01	10,23	2,13
Écart		193,78	6,52	3,99	0,8
Moyenne	9.d50.f3	266,93	30,04	15,35	2,11
Écart		188,84	17,24	9,13	0,74

Tableau A.6.10. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 10.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	10.d50.a1	271,96	25,38	11,92	2,29
Écart		158,98	9,99	4,75	0,88
Moyenne	10.d50.a2	229,75	24,94	11,4	2,34
Écart		137,92	7,51	3,62	0,83
Moyenne	10.d50.a3	234,5	25,79	11,46	2,25
Écart		149,96	7,39	3,85	0,86
Moyenne	10.d50.b2	275,07	22,59	10,77	2,31
Écart		179,79	5,65	3,83	0,97
Moyenne	10.d50.c1	264,36	24,26	11,14	2,37
Écart		145,1	7,39	4,12	0,85
Moyenne	10.d50.c2	255,38	25,46	11,52	2,41
Écart		130,91	8,78	4,04	1,02
Moyenne	10.d50.d1	294,35	24,09	11,32	2,34
Écart		160,83	6,89	3,84	1,04
Moyenne	10.d50.d2	245,64	27,27	12,05	2,45
Écart		132,26	9,9	4,35	0,98
Moyenne	10.d50.e1	243,95	27,99	12,63	2,38
Écart		130,81	9,18	4,53	0,84
Moyenne	10.d50.e2	289,91	24,73	11,68	2,32
Écart		169,02	6,82	3,56	1,07
Moyenne	10.d50.f1	274,5	23,98	11,46	2,26
Écart		169,96	7,39	3,85	0,86
Moyenne	10.d50.g1	240,12	23,96	11,83	2,2
Écart		137,81	6,67	3,81	0,89
Moyenne	10.d50.g2	260,85	28,59	13,22	2,3
Écart		158,57	11,72	4,48	0,99
Moyenne	10.d50.h1	229,59	24,82	10,95	2,41
Écart		154,12	7,43	3,53	0,81
Moyenne	10.d50.h2	240,73	26,43	11,73	2,4
Écart		107,74	9,21	3,73	0,96
Moyenne	10.d50.i1	239,29	27,88	12,41	2,44
Écart		155,82	11,65	4,79	1,1
Moyenne	10.d50.i2	281,17	27,01	12,18	2,43
Écart		148,39	9,57	4,53	1,02

Tableau A.6.11. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 11.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	11.d50.a1	272,9	21,63	10,28	2,24
Écart		174,36	10,3	5,13	0,82
Moyenne	11.d50.a2	283,42	23,62	10,66	2,4
Écart		162,24	11,01	4,55	1,06
Moyenne	11.d50.a3	247,32	23,44	10,95	2,32
Écart		146,31	11,29	4,91	1
Moyenne	11.d50.b1	296,37	23,16	10,54	2,35
Écart		152,79	9,62	4,28	0,92
Moyenne	11.d50.b2	213,26	20,7	9,72	2,42
Écart		115,18	8,44	4,62	1,17
Moyenne	11.d50.b3	222,43	23,08	10,1	2,46
Écart		112,53	10,04	4,09	0,95
Moyenne	11.d50.c1	273,44	21,58	9,35	2,45
Écart		156,81	9,09	3,51	0,93
Moyenne	11.d50.c2	228,7	19,46	9,26	2,3
Écart		178,73	6,23	3,3	0,92
Moyenne	11.d50.c3	251,63	23,57	10,2	2,57
Écart		128,5	10,95	3,9	1,57
Moyenne	11.d50.d1	264,24	22,93	9,86	2,5
Écart		122,09	9,71	4,07	0,97
Moyenne	11.d50.d2	235,02	23	9,9	2,53
Écart		144,36	10,27	3,75	1,16
Moyenne	11.d50.d3	242,63	22,43	9,93	2,49
Écart		167,79	7,66	3,92	1,01
Moyenne	11.d50.e1	272,14	22,89	10,21	2,43
Écart		139,01	12,04	4,58	1,08
Moyenne	11.d50.e2	239,04	20,3	9,47	2,32
Écart		129,06	7,83	3,77	0,88
Moyenne	11.d50.e3	214,61	22,16	10,11	2,44
Écart		126,09	10,99	4,74	1,2
Moyenne	11.d50.f1	297,87	20,47	9,77	2,26
Écart		154,98	8,17	3,84	0,96
Moyenne	11.d50.f2	283,46	20,65	10,53	2,14
Écart		145,57	8,11	4,4	0,98
Moyenne	11.d50.f3	220,9	21,07	10,03	2,23
Écart		137,26	8,09	3,97	0,8

Tableau A.6.12. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 12.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	12.d50.a1	256,06	20,34	10,44	2,12
Écart		161,27	6,08	4,07	0,78
Moyenne	12.d50.a2	290,19	22,12	11,45	2,08
Écart		166,04	5,56	3,4	0,75
Moyenne	12.d50.b1	269,89	25,45	12,5	2,17
Écart		121,84	9,66	4,55	0,84
Moyenne	12.d50.b2	287,98	22,7	11,46	2,14
Écart		165,13	8,35	4,55	0,78
Moyenne	12.d50.c1	233,91	24,9	12	2,21
Écart		167,99	8,38	3,78	0,83
Moyenne	12.d50.c2	241,1	25,05	11,76	2,13
Écart		161,62	10,62	5,46	0,8
Moyenne	12.d50.d1	261,65	24,24	11,48	2,23
Écart		184,45	11,9	5,22	0,87
Moyenne	12.d50.d2	282,68	22,24	10,6	2,27
Écart		148,28	10,55	4,61	0,95
Moyenne	12.d50.e1	226,22	22,01	10,74	2,2
Écart		126,99	8,56	4,41	0,82
Moyenne	12.d50.e2	298,28	21,02	10,79	2,09
Écart		132,55	7,73	4,28	0,79
Moyenne	12.d50.f1	233,88	22,62	11,12	2,15
Écart		177,95	6,4	3,3	0,69
Moyenne	12.d50.f2	258,89	24,73	12,36	2,16
Écart		136,24	10,01	4,88	1,03
Moyenne	12.d50.g1	225,6	21,13	11,65	1,99
Écart		141,31	5,39	3,99	0,84
Moyenne	12.d50.g2	274,19	23,52	12,73	2,03
Écart		111,07	7,25	4,26	0,88
Moyenne	12.d50.h1	280,58	22,83	11,6	2,17
Écart		186,04	6,41	4,16	0,88
Moyenne	12.d50.h2	256,72	22,54	11,63	2,15
Écart		178,82	5,87	3,75	0,93
Moyenne	12.d50.i1	273,85	26,02	12,48	2,23
Écart		123,4	8,5	4,15	0,81
Moyenne	12.d50.i2	291,54	23,73	11,49	2,21
Écart		151,3	7,75	3,81	0,88

Tableau A.6.13. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 13.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	13.d50.a1	282,56	22,43	11,57	2,08
Écart		132,98	9,14	4,74	0,78
Moyenne	13.d50.a2	237,57	22,34	10,74	2,08
Écart		147,1	8,82	4,9	0,65
Moyenne	13.d50.b1	281,14	21,33	11,46	2,05
Écart		114,72	7,62	4,66	0,83
Moyenne	13.d50.b2	264,69	20,16	9,12	2,21
Écart		125,7	7,55	4,9	0,8
Moyenne	13.d50.c1	282,5	21,34	11,34	2,08
Écart		128,59	8,2	4,8	0,88
Moyenne	13.d50.c2	266,32	21,89	9,86	2,22
Écart		156,13	10,1	5,2	0,76
Moyenne	13.d50.d2	298,19	21,9	11,05	2,13
Écart		149,2	9,33	4,9	0,83
Moyenne	13.d50.d1	260,8	26,4	12,74	2,17
Écart		173,61	14,96	7,11	0,81
Moyenne	13.d50.e1	234,72	20,49	9,71	2,11
Écart		130,03	7,07	4,82	0,68
Moyenne	13.d50.e2	228,41	21,05	9,79	2,15
Écart		141,07	7,89	5,42	0,91
Moyenne	13.d50.f1	269,75	20,48	11,03	1,98
Écart		129,54	7,6	4,32	0,73
Moyenne	13.d50.f2	242,55	22,2	12,4	1,97
Écart		133,26	10,82	6,47	0,91

Tableau A.6.14. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 14.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	14.d50.a1	292,63	22,44	11,26	2,2
Écart		140,94	9,36	4,98	0,98
Moyenne	14.d50.a2	248,63	23,53	11,96	2,17
Écart		146,24	9,19	5,03	1,07
Moyenne	14.d50.a3	265,34	22,49	11,66	2,04
Écart		116,06	9,51	4,71	0,77
Moyenne	14.d50.b1	256,05	22,66	11,37	2,16
Écart		134,55	9,26	5,1	0,77
Moyenne	14.d50.b2	219,97	24,11	12,28	2,15
Écart		146,92	9,16	5,29	0,85
Moyenne	14.d50.b3	277,22	21,9	10,93	2,16
Écart		114,59	7,79	4,2	0,81
Moyenne	14.d50.c1	259,63	23,68	11,95	2,08
Écart		182,49	13,99	5,85	0,8
Moyenne	14.d50.c2	223,08	25,18	11,93	2,26
Écart		159,26	11,24	5,14	0,85
Moyenne	14.d50.c3	295,59	23,3	11,13	2,26
Écart		168,95	10,44	5,12	0,88
Moyenne	14.d50.d1	252,21	26,72	11,98	2,32
Écart		158,88	16,96	6,42	0,91
Moyenne	14.d50.d2	281,28	22,47	11,12	2,24
Écart		119,48	8,03	4,7	0,97
Moyenne	14.d50.d3	275,76	23,36	11,7	2,18
Écart		158,73	9,49	5,38	0,82
Moyenne	14.d50.e1	209,3	23,57	12,13	2,04
Écart		146,27	9,79	4,94	0,69
Moyenne	14.d50.e2	271,78	22,92	11,37	2,14
Écart		137,68	10,24	4,6	0,81
Moyenne	14.d50.e3	241,23	25,4	12,35	2,19
Écart		189,66	12,38	6,38	0,84
Moyenne	14.d50.f1	226,3	24,63	12,09	2,17
Écart		187,22	11,71	5,44	0,78
Moyenne	14.d50.f2	252,7	23,85	11,75	2,03
Écart		127,26	7,95	4,62	0,68
Moyenne	14.d50.f3	237,47	25,4	12,58	2,13
Écart		188,79	12,02	5,22	0,87
Moyenne	14.d50.g1	295,4	21,87	11,65	2,01
Écart		157,63	8,88	4,91	0,71
Moyenne	14.d50.g2	210,05	22,94	11,71	2,13
Écart		158,56	9,36	5,22	0,89
Moyenne	14.d50.g3	220,62	23,71	12,42	2,09
Écart		159,37	9,14	5,44	0,8
Moyenne	14.d50.h1	279,63	22,32	10,86	2,21
Écart		123,77	8,37	4,17	0,87
Moyenne	14.d50.h2	213,1	25,19	11,72	2,35
Écart		164,2	12,29	4,93	1,32
Moyenne	14.d50.h3	283,68	21,8	11,33	2,12
Écart		125,58	8,12	4,72	0,87
Moyenne	14.d50.i1	291,23	28,88	13,19	2,32
Écart		195,78	17,96	6,94	1,02
Moyenne	14.d50.i1	240,06	24,69	11,38	2,36
Écart		134,08	9,98	4,58	1,05

Tableau A.6.16. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 16.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	16.d50.a1	285,08	23,44	11,08	2,28
Écart		134,7	6,36	3,41	0,87
Moyenne	16.d50.a2	222,74	24,77	10,77	2,3
Écart		117,46	6,62	2,91	0,85
Moyenne	16.d50.b1	253,66	25,05	11,84	2,27
Écart		139,6	7,79	3,85	0,89
Moyenne	16.d50.b2	289,97	24,02	11,42	2,25
Écart		163,55	7,68	3,52	0,9
Moyenne	16.d50.c1	243,8	24,33	10,93	2,38
Écart		179,44	8,06	3,46	0,93
Moyenne	16.d50.c2	205,8	25,27	11,62	2,35
Écart		106,93	8,5	4,07	1
Moyenne	16.d50.d1	223,63	21,24	10,55	2,22
Écart		126,58	6,93	4,38	0,88
Moyenne	16.d50.d2	271,11	24,24	11,54	2,3
Écart		135,24	7,99	3,96	0,96
Moyenne	16.d50.e1	229,1	25,92	12,29	2,25
Écart		137,71	10,51	4,74	0,92
Moyenne	16.d50.e2	292,74	23,62	10,87	2,29
Écart		117,63	8,26	3,1	0,9
Moyenne	16.d50.f1	248,45	26,16	12,57	2,2
Écart		116,55	8,89	4,26	0,75
Moyenne	16.d50.f2	252,39	25,89	12,96	2,2
Écart		165,47	9,82	5,5	0,96
Moyenne	16.d50.g1	229,07	24,24	11,68	2,16
Écart		157,57	11,42	4,73	0,74
Moyenne	16.d50.g2	286,44	22,82	11,47	2,16
Écart		149	7,61	3,83	0,91
Moyenne	16.d50.h1	211,53	27,76	12,07	2,3
Écart		114,91	8,73	4,26	0,76
Moyenne	16.d50.h2	223,62	25,86	11,65	2,22
Écart		103,42	6,74	4,27	0,88
Moyenne	16.d50.i1	260,88	24,84	11,09	2,42
Écart		145,54	7,74	3,77	0,93
Moyenne	16.d50.i2	219,2	25,94	11,39	2,41
Écart		116,95	9,5	4,06	0,82

Tableau A.6.17. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 17.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	17.d50.a1	296,86	20,97	10,26	2,21
Écart		171,45	7,43	4,11	0,88
Moyenne	17.d50.a2	267,68	21,78	10,66	2,21
Écart		156,01	8,3	4,25	0,86
Moyenne	17.d50.b1	216,36	24,76	11,16	2,28
Écart		127,98	15,2	5,48	0,79
Moyenne	17.d50.b2	280,91	22,09	11,01	2,18
Écart		165,55	10,2	5,06	0,89
Moyenne	17.d50.c1	223,77	25,37	11,15	2,34
Écart		171,22	17,89	5,24	1,01
Moyenne	17.d50.c2	221,93	24,92	11,88	2,25
Écart		191,93	13,46	5,37	0,96
Moyenne	17.d50.d1	227,19	26,57	11,39	2,49
Écart		177,77	14,19	5,44	1,04
Moyenne	17.d50.e1	255,59	21,96	10,66	2,06
Écart		167,53	10,24	4,63	0,77
Moyenne	17.d50.e2	285,37	20,28	10,58	2,06
Écart		161,93	7,31	4,16	0,75
Moyenne	17.d50.f1	276,15	20,65	10,82	2,08
Écart		199,78	6,95	4,52	0,77
Moyenne	17.d50.f2	276,61	21,48	11,17	2,13
Écart		163,24	8,44	5,33	0,84

Tableau A.6.18. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 18.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	18.d50.a1	267,92	22,22	10,64	2,24
Écart		132,8	6,66	3,02	0,93
Moyenne	18.d50.a2	285,66	23,84	11,34	2,22
Écart		110,72	8,3	3,83	0,8
Moyenne	18.d50.b1	238,17	24,99	11,47	2,35
Écart		100,9	7,72	3,77	0,92
Moyenne	18.d50.b2	238,5	25,75	11,89	2,34
Écart		130,26	7	3,43	0,97
Moyenne	18.d50.c1	260,25	24,5	11,11	2,38
Écart		158,08	7,78	3,88	0,95
Moyenne	18.d50.c2	234,24	27,04	12,1	2,4
Écart		130,03	9,88	4,16	0,95
Moyenne	18.d50.d1	227,18	24,54	11,54	2,32
Écart		167,38	7,6	3,91	1,01
Moyenne	18.d50.d2	278,23	24,68	11,49	2,33
Écart		133,35	8,6	4,06	0,97
Moyenne	18.d50.e1	245,21	26,12	11,78	2,39
Écart		114,14	9,79	4,02	1,03
Moyenne	18.d50.e2	212,5	26,15	11,93	2,4
Écart		115,11	9,15	4,16	1,11
Moyenne	18.d50.f1	252,06	27,13	12,9	2,25
Écart		148,87	10,59	4,57	0,85
Moyenne	18.d50.f2	291,07	20,88	10,49	2,22
Écart		152,8	8,2	4,4	1,04
Moyenne	18.d50.g1	223,5	25,7	12,44	2,2
Écart		120,03	9,67	4,11	0,82
Moyenne	18.d50.g2	270,28	20,18	10,5	2,2
Écart		114,33	7,51	4,69	1,22
Moyenne	18.d50.h1	280,39	24,25	11,02	2,35
Écart		141,9	9,12	3,81	0,95
Moyenne	18.d50.h2	264,46	24,69	11,98	2,25
Écart		100,39	8,29	3,9	0,98
Moyenne	18.d50.i1	275,16	24,51	10,08	2,61
Écart		174,48	7,41	3,08	1,03
Moyenne	18.d50.i2	229,37	27,84	11,77	2,54
Écart		117,46	9,42	4,19	1,01

Tableau A.6.19. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 19.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	19.d50.a1	273,64	21,7	9,82	2,21
Écart		178,59	20,89	11,29	1,24
Moyenne	19.d50.a2	226,07	21,92	9,49	2,31
Écart		129,11	15,8	6,71	1,12
Moyenne	19.d50.b1	287,73	21,16	9,24	2,29
Écart		143,95	17,54	8,42	1,75
Moyenne	19.d50.b2	266,8	22,99	9,3	2,47
Écart		194,2	16,02	5,91	1,46
Moyenne	19.d50.c1	222,19	23,96	10,29	2,33
Écart		163,91	14,01	7,69	1,16
Moyenne	19.d50.c2	257,78	27,43	11,02	2,49
Écart		206,66	26,44	10,13	1,23
Moyenne	19.d50.d1	284,88	23,79	9,42	2,53
Écart		130,27	15,92	6,16	1,21
Moyenne	19.d50.e1	209,11	24,1	10,85	2,22
Écart		168,17	17,41	7,56	1,26
Moyenne	19.d50.e2	267,02	23,43	9,46	2,48
Écart		143,4	17,79	7,46	1,21
Moyenne	19.d50.f1	283,35	22,82	10,47	2,18
Écart		198,72	14,05	6,92	1
Moyenne	19.d50.f2	235,4	22,13	9,8	2,26
Écart		218,37	12,49	6,29	1,01

Tableau A.6.20. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 20.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	20.d50.a	63,36	12,43	5,7	2,18
Écart		30,59	4,91	2,36	1,19
Moyenne	20.d50.b	54,05	10,58	4,89	2,16
Écart		24,21	3,79	1,92	1,28
Moyenne	20.d50.c	57,7	11,33	5,05	2,24
Écart		32,87	5,31	2,36	1,34
Moyenne	20.d50.d	65,43	13,08	5,7	2,29
Écart		37,04	5,55	2,39	1,3
Moyenne	20.d50.e	55,87	10,71	5,1	2,1
Écart		25,64	3,68	2,06	1,16
Moyenne	20.d50.f	57,12	11,68	5,39	2,17
Écart		29,41	4,27	2,11	1,23
Moyenne	20.d50.g	66,36	10,59	5,18	2,04
Écart		26,9	3,92	2,13	0,95
Moyenne	20.d50.h	65,09	13,91	6,2	2,24
Écart		42,09	6,2	2,59	1,1
Moyenne	20.d50.i	75,78	14,83	6,32	2,35
Écart		58,79	9,47	4,1	1,34

Tableau A.6.21. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 21.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	21.d50.a1	66,33	14,19	6,42	2,21
Écart		43,71	6,13	3,43	0,91
Moyenne	21.d50.b1	50,08	12,1	5,15	2,35
Écart		33,11	4,92	2,54	1,18
Moyenne	21.d50.c1	48,11	12,51	5,44	2,3
Écart		32,04	4,83	2,65	1,06
Moyenne	21.d50.d1	83,73	15,84	6,21	2,55
Écart		65,69	9,32	4,34	0,94
Moyenne	21.d50.e1	60,44	13,73	6,05	2,27
Écart		47,03	6,38	3	1,01
Moyenne	21.d50.f1	52,82	12,25	5,57	2,2
Écart		34,67	4,73	2,46	0,91

Tableau A.6.22. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 22.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	22.d50.a	54,76	11,98	5,12	2,34
Écart		20,28	3,12	1,84	1,1
Moyenne	22.d50.b	59,32	12,2	4,98	2,45
Écart		22,48	3,65	1,64	1,11
Moyenne	22.d50.c	56,43	12,25	5,02	2,44
Écart		23,61	4,17	1,77	1,13
Moyenne	22.d50.d	67,03	12,85	5,29	2,43
Écart		37,95	5,62	2,32	1,23
Moyenne	22.d50.e	52,59	11,52	4,9	2,35
Écart		17,88	2,82	1,59	0,89
Moyenne	22.d50.f	58,92	12,45	5,21	2,39
Écart		24,31	3,47	1,87	1,08
Moyenne	22.d50.g	59,57	10,84	5,08	2,13
Écart		24,24	3,39	1,87	1,02
Moyenne	22.d50.h	54,39	11,87	5,01	2,37
Écart		17,55	2,85	1,7	0,94
Moyenne	22.d50.i	71,47	15,26	6,18	2,47
Écart		33,57	10,29	4,71	1,17

Tableau A.6.23. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 23.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	23.d50.a1	53,73	12,58	5,22	2,41
Écart		38,96	5,21	2,55	1,17
Moyenne	23.d50.b1	46,95	12,32	5,03	2,45
Écart		28,58	4,13	2,31	1,42
Moyenne	23.d50.c1	52,39	11,6	4,66	2,49
Écart		21,85	3,86	1,82	1,29
Moyenne	23.d50.d1	45,12	11,87	4,69	2,53
Écart		27,84	5,39	1,97	1,58
Moyenne	23.d50.e1	58,44	12,25	5,26	2,33
Écart		50,12	6,52	2,95	1,09
Moyenne	23.d50.f1	51,85	12,65	5,55	2,28
Écart		32,54	4,41	2,43	1,14

Tableau A.6.24. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 24.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	24.d50.a	54,73	11,73	4,91	2,39
Écart		26,6	4,17	1,92	1,35
Moyenne	24.d50.b	54,43	12,45	5,23	2,38
Écart		47,41	5,67	2,85	1,04
Moyenne	24.d50.c	51,45	12,1	4,55	2,66
Écart		21,84	3,49	1,79	1,3
Moyenne	24.d50.d	61,66	14,06	5,17	2,72
Écart		37,53	5,81	2,31	1,45
Moyenne	24.d50.e	59,74	13,62	5,14	2,65
Écart		32,96	5,02	2,33	1,33
Moyenne	24.d50.f	66,48	13,4	5,75	2,33
Écart		53,68	6,83	2,8	1,17
Moyenne	24.d50.g	68,41	13,55	5,84	2,32
Écart		51,07	5,97	3,11	1,07
Moyenne	24.d50.h	57,71	13,22	4,99	2,65
Écart		35,5	5,07	2,48	1,33
Moyenne	24.d50.i	72,29	13,79	5,09	2,71
Écart		80,56	9,3	3,65	1,47

Tableau A.6.25. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 25.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	25.d50.a1	52,78	11,06	4,59	2,41
Écart		23,92	4,2	1,96	1,4
Moyenne	25.d50.b1	59,94	11,14	4,44	2,51
Écart		20,89	3,8	1,86	1,61
Moyenne	25.d50.c1	66,04	10,89	4,34	2,51
Écart		27,14	2,83	1,71	1,15
Moyenne	25.d50.d1	40,18	11,27	4,27	2,64
Écart		24,38	4,75	1,7	1,59
Moyenne	25.d50.e1	67,19	10,94	4,54	2,41
Écart		38,26	3,13	1,75	1,57
Moyenne	25.d50.f1	68,08	10,5	4,43	2,37
Écart		28,95	3,73	1,74	1,34

Tableau A.6.26. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 26.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	26.d50.a	51,44	13,16	5,14	2,56
Écart		40,32	6,66	2,81	1,33
Moyenne	26.d50.b	53,4	12,09	4,74	2,55
Écart		25,73	4,96	2	1,6
Moyenne	26.d50.c	71,41	13,67	5,14	2,66
Écart		90,56	9,39	4,09	1,5
Moyenne	26.d50.d	55,31	14,34	5,29	2,71
Écart		63,89	7,84	3,3	1,53
Moyenne	26.d50.e	59,39	13,02	4,95	2,63
Écart		37,48	6,85	2,32	1,46
Moyenne	26.d50.f	94,56	14,79	6,06	2,44
Écart		96,6	13,5	6,46	1,34
Moyenne	26.d50.g	61,88	14,15	5,87	2,41
Écart		60,44	9,4	3,31	1,22
Moyenne	26.d50.h	56,27	13,3	5,02	2,65
Écart		56,15	7,59	3,02	1,26
Moyenne	26.d50.i	59,66	12,4	4,46	2,78
Écart		20,5	4,14	1,83	1,59

Tableau A.6.27. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 27.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	27.d50.a1	58,43	12,1	5,5	2,5
Écart		54,56	6,83	2,74	1,24
Moyenne	27.d50.b1	57,4	12,45	4,96	2,51
Écart		30,44	4,74	2	1,2
Moyenne	27.d50.c1	62,03	14,22	5,49	2,59
Écart		41,11	8,04	2,62	1,23
Moyenne	27.d50.d1	53,04	13,62	5,14	2,65
Écart		39,97	5,7	2,27	1,14
Moyenne	27.d50.e1	67,67	13,11	5,51	2,38
Écart		46,16	5,9	2,58	1,09
Moyenne	27.d50.f1	64,89	12,45	5,23	2,38
Écart		38,52	5,26	2,36	1,18

Tableau A.6.28. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 28.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	28.d50.a	59,5	12,01	5,29	2,27
Écart		31,25	4,71	2,06	1,1
Moyenne	28.d50.b	49,35	12,06	5,29	2,28
Écart		30,76	4,26	2,23	1,04
Moyenne	28.d50.c	58,81	12,18	5,16	2,36
Écart		45,73	6,14	2,85	1,13
Moyenne	28.d50.d	66,77	12,19	5,06	2,41
Écart		90,46	7,74	4,13	1,08
Moyenne	28.d50.e	54,2	12,06	5,22	2,31
Écart		41,37	5,47	2,85	1,16
Moyenne	28.d50.f	53,88	12,64	5,57	2,27
Écart		36,23	4,79	2,54	1
Moyenne	28.d50.g	66,67	13,58	6,26	2,17
Écart		65,63	7,77	3,26	0,99
Moyenne	28.d50.h	58,52	13,46	5,8	2,32
Écart		43,72	6,18	2,72	1
Moyenne	28.d50.i	52,11	12,1	4,92	2,46
Écart		43,1	5,76	2,38	1,44

Tableau A.6.29. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 29.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	29.d50.a1	65,95	12,66	5,49	2,31
Écart		77,11	7,28	3,57	1,06
Moyenne	29.d50.b1	53,02	11,8	5,11	2,31
Écart		35,25	4,97	2,36	1,02
Moyenne	29.d50.c1	66,34	12,24	5,21	2,35
Écart		61,99	7,45	3,55	1,09
Moyenne	29.d50.d1	69,81	13,94	5,88	2,37
Écart		78,63	7,8	3,84	1,11
Moyenne	29.d50.d2	64,49	14,42	5,96	2,42
Écart		56,04	6,49	3,01	0,99
Moyenne	29.d50.e1	83,98	13,88	5,83	2,38
Écart		88,23	10,91	5,25	1,14
Moyenne	29.d50.f1	64,48	13,86	6,16	2,25
Écart		67,29	7,67	3,34	1,05

Tableau A.6.30. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 30.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	30.d50.a	55,35	12,95	5,51	2,35
Écart		38,47	5,02	2,37	1,04
Moyenne	30.d50.b	61,31	13,06	5,33	2,45
Écart		57,8	7,27	2,89	1,16
Moyenne	30.d50.c	65,63	12,32	5,11	2,41
Écart		54,11	7,06	2,61	1,11
Moyenne	30.d50.d	72,93	13,19	5,32	2,48
Écart		68,32	8,37	3,18	1,19
Moyenne	30.d50.e	67,09	13,36	5,43	2,46
Écart		61,25	7,47	2,88	1
Moyenne	30.d50.f	61,13	11,89	5,06	2,35
Écart		57,67	7,05	2,61	1,02
Moyenne	30.d50.g	51,43	12,33	5,36	2,3
Écart		42,67	5,8	2,29	0,98
Moyenne	30.d50.h	59,9	13	5,53	2,35
Écart		52,71	6,78	2,72	1,08
Moyenne	30.d50.i	63,25	13,18	5,19	2,54
Écart		58,45	7,95	2,56	1,36

Tableau A.6.31. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 31.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	31.d50.a1	56,79	13,23	5,56	2,38
Écart		37,66	5,47	2,25	1,06
Moyenne	31.d50.b1	57,32	12,41	5,17	2,4
Écart		38,09	5,1	2,37	1,14
Moyenne	31.d50.c1	85,26	15,55	6,22	2,5
Écart		97,97	9,83	4,26	1,2
Moyenne	31.d50.d1	70,41	15,84	6,21	2,55
Écart		86,4	11,29	4,7	1,16
Moyenne	31.d50.e1	59,04	11,71	5,16	2,27
Écart		40,31	5,41	2,4	1,08
Moyenne	31.d50.f1	88,57	14,3	6,38	2,24
Écart		74,9	10,57	5,58	0,95

Tableau A.6.32. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 32.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	32.d50.a	56,49	13,26	5,26	2,52
Écart		50,34	6,57	2,4	1,17
Moyenne	32.d50.b	61,37	14	5,51	2,54
Écart		78,54	7,63	3,21	1,23
Moyenne	32.d50.c	62,61	14,29	5,54	2,58
Écart		60,87	7,4	2,58	1,08
Moyenne	32.d50.d	69,69	13,49	5,17	2,61
Écart		74,07	8,85	3,2	1,2
Moyenne	32.d50.e	69,1	13,86	5,48	2,53
Écart		97,62	9,86	3,09	1,29
Moyenne	23.d50.f	59,46	12,72	5,17	2,46
Écart		34,11	4,95	2,12	1,12
Moyenne	32.d50.g	58,01	13,12	5,78	2,27
Écart		65,36	6,52	3,04	0,93
Moyenne	32.d50.h	69,78	13,78	5,47	2,52
Écart		86,51	8,22	3,82	1,37
Moyenne	32.d50.i	62,15	13,93	5,18	2,69
Écart		61,2	7,7	2,71	1,27

Tableau A.6.32. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 32.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	32.d50.a	56,49	13,26	5,26	2,52
Écart		50,34	6,57	2,4	1,17
Moyenne	32.d50.b	61,37	14	5,51	2,54
Écart		78,54	7,63	3,21	1,23
Moyenne	32.d50.c	62,61	14,29	5,54	2,58
Écart		60,87	7,4	2,58	1,08
Moyenne	32.d50.d	69,69	13,49	5,17	2,61
Écart		74,07	8,85	3,2	1,2
Moyenne	32.d50.e	69,1	13,86	5,48	2,53
Écart		97,62	9,86	3,09	1,29
Moyenne	23.d50.f	59,46	12,72	5,17	2,46
Écart		34,11	4,95	2,12	1,12
Moyenne	32.d50.g	58,01	13,12	5,78	2,27
Écart		65,36	6,52	3,04	0,93
Moyenne	32.d50.h	69,78	13,78	5,47	2,52
Écart		86,51	8,22	3,82	1,37
Moyenne	32.d50.i	62,15	13,93	5,18	2,69
Écart		61,2	7,7	2,71	1,27

Tableau A.6.33. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 33.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	33.d50.a1	57,7	13	5,2	2,5
Écart		34,21	4,94	2,33	1,26
Moyenne	33.d50.a2	62,05	13,35	5,47	2,44
Écart		53,73	7,12	3,3	1,09
Moyenne	33.d50.b1	58,49	14,33	5,71	2,51
Écart		57,39	7,1	3,06	1,2
Moyenne	33.d50.b2	75,36	14,5	5,73	2,53
Écart		93,96	9,22	4,28	1,19
Moyenne	33.d50.c1	83,24	14,29	5,74	2,49
Écart		88,6	13,34	5,74	1,05
Moyenne	33.d50.d1	64,35	14,31	5,24	2,73
Écart		80,91	8,2	3,94	1,28
Moyenne	33.d50.d2	84,37	14,92	5,76	2,59
Écart		67,6	11,85	5,39	1,12
Moyenne	33.d50.e1	68,73	14,83	6,23	2,38
Écart		82,37	8,17	5,1	0,95
Moyenne	33.d50.e2	69,05	15,01	6,1	2,46
Écart		75,74	9,07	3,97	1,1
Moyenne	33.d50.f1	57,03	13,81	5,66	2,44
Écart		48,14	6,32	2,86	1,1
Moyenne	33.d50.f2	63,02	14,19	6,09	2,33
Écart		69,8	7,02	3,71	1,33

Tableau A.6.35. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 35.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	35.d50.a1	52,07	12,85	5,18	2,48
Écart		32,81	4,52	2,11	1,25
Moyenne	35.d50.b1	55,83	12,95	5,22	2,48
Écart		36,37	5,11	2,1	1,14
Moyenne	35.d50.b2	59,32	12,75	5,06	2,52
Écart		30,42	4,09	2,02	1,33
Moyenne	35.d50.c1	54,74	13,59	5,17	2,63
Écart		37,71	6,02	2,18	1,43
Moyenne	35.d50.d1	76	14,34	5,29	2,71
Écart		88,63	9,66	3,37	1,29
Moyenne	35.d50.e1	75,58	14,42	5,86	2,46
Écart		86,51	8,6	3,91	1,19
Moyenne	35.d50.f1	57,39	12,24	5,08	2,41
Écart		26,17	3,89	1,93	1,22

Tableau A.6.36. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 36.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	36.d50.a1	307,67	33,02	16,27	2,19
Écart		154,11	14,32	6,05	0,92
Moyenne	36.d50.a2	315,74	31,02	16,36	1,99
Écart		146,41	10,09	4,99	0,69
Moyenne	36.d50.b1	324,94	32,47	17,48	1,94
Écart		178,1	10,65	5,55	0,64
Moyenne	36.d50.b2	304,38	34,08	18,32	1,86
Écart		139,11	15,31	6,6	0,5
Moyenne	36.d50.c1	294,27	32,45	16,89	1,97
Écart		198,37	9,85	4,48	0,48
Moyenne	36.d50.c2	327,22	36,77	17,55	2,19
Écart		155,05	12,57	5,8	0,73
Moyenne	36.d50.d1	301,11	36,8	16,8	2,19
Écart		161,06	10,18	5,19	0,7
Moyenne	36.d50.d2	292,61	33,34	17,01	1,96
Écart		154,02	7,24	5,39	0,6
Moyenne	36.d50.e1	326,38	37,38	19,81	1,99
Écart		162,46	16,63	10,4	0,63
Moyenne	36.d50.e2	285,05	28,73	15,77	1,99
Écart		119,19	6,84	5,19	0,82
Moyenne	36.d50.f1	312,08	32,68	16,34	2
Écart		143,66	8,92	5,28	0,74
Moyenne	36.d50.f2	327,8	33,7	15,32	2,2
Écart		158,57	9,26	5,31	0,76
Moyenne	36.d50.g1	322,08	32,03	16,51	1,94
Écart		101,19	7,22	3,47	0,49
Moyenne	36.d50.g2	335,64	31,11	17,32	1,87
Écart		161,45	9,79	4,17	0,64
Moyenne	36.d50.i1	318,47	33,54	15,6	2,15
Écart		209,97	10,17	10,2	0,75
Moyenne	36.d50.i2	287,81	33,11	15,47	2,14
Écart		170,07	11,59	9,09	0,93
Moyenne	36.d50.h1	298,22	25,38	12,38	2,05
Écart		162,31	10,14	7,91	0,78
Moyenne	36.d50.h2	307,16	35,13	16,97	2,07
Écart		159,38	10,64	5,79	0,76

Tableau A.6.37. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 37.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	37.d50.a1	289,16	15,49	7,27	2,13
Écart		187,57	9,96	5,04	0,84
Moyenne	37.d50.b1	305,59	15,31	7,09	2,16
Écart		164,86	11,19	4,77	0,89
Moyenne	37.d50.b2	274,68	14,99	7,04	2,13
Écart		193,48	7,9	4,49	1,04
Moyenne	37.d50.c1	300,31	15,05	7,17	2,1
Écart		207,87	8,5	4,44	1
Moyenne	37.d50.d1	280,94	13,36	6,09	2,19
Écart		149,81	8,59	4,75	1,02
Moyenne	37.d50.e1	260,36	16,29	7,54	2,16
Écart		170,77	14,81	6,46	1,05
Moyenne	37.d50.e2	294,74	15,11	7,33	2,06
Écart		180,6	8,61	4,81	0,77
Moyenne	37.d50.f1	301,3	15,01	7,69	1,95
Écart		155,85	7,33	4,89	0,78

Tableau A.6.38. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 38.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	38.d50.a1	323,63	27,99	13,14	2,13
Écart		132,61	10,63	5,64	0,89
Moyenne	38.d50.b1	296,61	26,51	12,05	2,2
Écart		120,03	9,99	4,41	1,17
Moyenne	38.d50.b2	283,55	26,63	12,74	2,09
Écart		131,52	9,64	5,34	0,87
Moyenne	38.d50.c1	322,13	27,36	12,38	2,21
Écart		185,98	12,08	6,45	1,03
Moyenne	38.d50.d1	295,26	24,56	11,64	2,11
Écart		177,03	12,25	6,68	1,34
Moyenne	38.d50.d2	293,26	25,72	12,19	2,11
Écart		101,26	8,68	4,94	1,49
Moyenne	38.d50.e1	301,87	27,64	13,16	2,1
Écart		113,21	10,5	4,62	1,18
Moyenne	38.d50.f1	288,85	28,23	13,84	2,04
Écart		192,91	8,65	4,48	1,09
Moyenne	38.d50.g1	280,93	26,15	12,82	2,04
Écart		182,33	13,34	6,05	0,9
Moyenne	38.d50.h1	283,42	25,42	12,52	2,03
Écart		133,66	10,67	5,97	1,53
Moyenne	38.d50.i1	293,74	26,61	11,62	2,29
Écart		149,65	8,38	4,72	1,25
Moyenne	38.d50.i2	305,59	25,99	11,92	2,18
Écart		121,67	8,33	4,81	0,96

Tableau A.6.39. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 39.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	39.d50.a1	323,32	14,71	6,94	2,12
Écart		188,32	10,89	5,16	1,16
Moyenne	39.d50.a2	293,05	14,04	6,5	2,16
Écart		184,39	10,63	4,82	1,29
Moyenne	39.d50.b1	315,71	14,18	6,33	2,24
Écart		171,69	9,89	4,73	1,36
Moyenne	39.d50.b2	309,19	15,23	6,89	2,21
Écart		175,49	11,26	5,27	1,06
Moyenne	39.d50.c1	299,89	16,15	7,16	2,26
Écart		150,81	12,16	5,34	1,41
Moyenne	39.d50.c2	296,52	17,66	8	2,21
Écart		172,43	12,3	5,35	1,05
Moyenne	39.d50.d1	279,93	14,58	6,48	2,25
Écart		184,62	8,76	4,14	1,26
Moyenne	39.d50.d2	291,11	15,43	6,87	2,25
Écart		175,55	9,75	4,65	1,34
Moyenne	39,d50.e1	277,33	14,18	6,96	2,04
Écart		172,11	7,33	4,09	1,29
Moyenne	39.d50.e2	283,21	14,63	7	2,09
Écart		193,9	8,67	4,54	1,4
Moyenne	39.d50.f1	294,72	16,36	7,85	2,08
Écart		172,05	14,85	6,74	1,12
Moyenne	39.d50.f2	316,28	15,92	8,07	1,97
Écart		189,99	10,31	5,66	0,95

Tableau A.6.40. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 40.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	40.d50.a1	295,78	27,18	12,08	2,25
Écart		190,35	7,6	4,2	1,07
Moyenne	40.d50.a2	285,48	27,16	12,29	2,21
Écart		149,49	8,71	4,25	1,3
Moyenne	40.d50.b1	316,15	25,44	11,06	2,3
Écart		140,67	10,64	5,32	0,85
Moyenne	40.d50.b2	299,34	25,04	11,32	2,3
Écart		186,23	10,76	5,63	0,95
Moyenne	40.d50.c1	300,55	23,89	10,57	2,26
Écart		154,54	14,42	6,93	1,43
Moyenne	40.d50.d1	287,04	23,34	10,61	2,2
Écart		141,7	11,5	5,04	1,17
Moyenne	40.d50.d2	294,31	21,32	10,2	2,09
Écart		155,16	11,9	5,46	1,32
Moyenne	40.d50.e1	297,21	25,48	11,08	2,3
Écart		157,36	12,23	5,24	1,01
Moyenne	40.d50.f1	310,17	25,73	11,75	2,19
Écart		140,88	10,05	5,19	0,93
Moyenne	40.d50.f2	308,74	25,52	11,98	2,13
Écart		159,14	9,48	5,06	1,22
Moyenne	40.d50.g1	272,61	24,35	11,88	2,05
Écart		145,01	11,39	5,91	0,82
Moyenne	40.d50.g2	291,23	24,83	12,11	2,05
Écart		176,12	11,78	6,78	1,13
Moyenne	40.d50.h1	281,56	24,4	11,73	2,08
Écart		155,22	11,06	5,51	1,01
Moyenne	40.d50.h2	313,86	28,01	11,48	2,44
Écart		107,11	8,29	4,86	1,03
Moyenne	40.d50.i1	271,59	24,32	10,67	2,28
Écart		152,43	14,31	7,07	1,26

Tableau A.6.41. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 41.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	41.d50.a1	277,34	15,87	6,87	2,31
Écart		174,3	12,58	5,75	1,3
Moyenne	41.d50.a2	303,21	18,28	8,38	2,18
Écart		169,7	13,04	5,98	1,14
Moyenne	41.d50.b1	293,54	15,42	6,68	2,31
Écart		158,84	9,25	4,1	1,03
Moyenne	41.d50.c1	309,76	17,81	7,61	2,34
Écart		175,21	10,27	4,92	1,17
Moyenne	41.d50.c2	318,25	16,91	7,74	2,18
Écart		135,87	10,72	5,14	1,32
Moyenne	41.d50.d1	294,01	15,64	6,89	2,27
Écart		144,43	8,47	4,24	1,23
Moyenne	41.d50.e1	290,08	15,07	6,78	2,22
Écart		163,36	7,57	4,72	1,37
Moyenne	41.d50.f1	282,43	13,73	6,49	2,11
Écart		159,27	7,48	4,12	1,17

Tableau A.6.42. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 42.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	42.d50.a1	279,97	22,37	9,9	2,26
Écart		165,25	11,75	5,93	1,08
Moyenne	42.d50.a2	289,27	20,84	9,65	2,16
Écart		173,95	12,74	5,92	1,28
Moyenne	42.d50.b1	291,32	21,9	9,2	2,38
Écart		166,03	8,06	4,54	1,22
Moyenne	42.d50.b2	294,33	20,42	9,41	2,17
Écart		159,96	8,19	4,14	1,26
Moyenne	42.d50.c1	299,14	20,67	8,54	2,42
Écart		115,42	10,02	4,28	1,23
Moyenne	42.d50.c2	307,96	18,89	8,47	2,23
Écart		154,6	10,42	5,25	1,24
Moyenne	42.d50.d1	271,81	20,21	8,98	2,25
Écart		125,68	9,81	4,85	1,09
Moyenne	42.d50.d2	292,71	19,79	9,12	2,17
Écart		139,12	8,92	4,62	1,47
Moyenne	42.d50.e1	306,65	20,91	9,09	2,3
Écart		161,58	8,52	4,21	1,31
Moyenne	42.d50.e2	304,54	20,86	9,84	2,12
Écart		154,2	8,51	4,56	2,09
Moyenne	42.d50.f1	313,2	21,99	10,18	2,16
Écart		133,71	10,22	4,85	1,12
Moyenne	42.d50.f2	279,75	23,74	10,06	2,36
Écart		136,47	12,04	4,89	1,02
Moyenne	42.d50.g1	291,01	22,91	9,96	2,3
Écart		128,67	14,48	6,54	1,09
Moyenne	42.d50.g2	294,86	22,53	10,24	2,2
Écart		107,56	8,81	4,86	1,3
Moyenne	42.d50.g3	296,09	22,76	10,84	2,1
Écart		144,11	10,29	5,36	1
Moyenne	42.d50.h1	279,82	20,47	9,18	2,23
Écart		124,59	9,79	4,96	0,98
Moyenne	42.d50.h2	293,09	20,29	9,1	2,23
Écart		121,55	9,55	5,3	1,14
Moyenne	42.d50.i1	314,95	20,22	8,53	2,37
Écart		172,03	7,6	3,58	1,29
Moyenne	42.d50.i2	290,25	19,65	8,36	2,35
Écart		142,81	9,29	4,29	1,35

Tableau A.6.43. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 43.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	43.d50.a1	280,67	22,36	9,92	2,25
Écart		153,98	12,23	4,97	0,92
Moyenne	43.d50.a2	308,17	17,64	8,01	2,2
Écart		187,04	7,62	4,25	1,34
Moyenne	43.d50.b1	305,4	16,84	7,53	2,24
Écart		199,15	7,87	4,34	1,3
Moyenne	43.d50.c1	325,99	17,76	7,59	2,34
Écart		170,84	10,06	4,89	0,98
Moyenne	43.d50.c2	294,71	17,5	7,17	2,44
Écart		175,16	8,87	5,32	1,28
Moyenne	43.d50.d1	262,29	20,26	8,77	2,31
Écart		186,06	12,61	5,66	1,31
Moyenne	43.d50.e1	310,57	18,62	7,89	2,36
Écart		173,96	10,94	5,14	1,03
Moyenne	43.d50.f1	297,64	18,12	8,31	2,18
Écart		190,17	10,21	5,17	1,04
Moyenne	43.d50.f2	324,57	18,43	8,3	2,22
Écart		168,55	8,5	5,05	1,09

Tableau A.6.44. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 44.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	44.d50.a1	265,49	27,34	13,81	1,98
Écart		149,29	9,74	5,86	0,84
Moyenne	44.d50.a2	278,73	23,09	12,62	1,83
Écart		124,91	9,1	5,09	1,02
Moyenne	44.d50.b1	282,81	27,51	13,1	2,1
Écart		147,5	10,45	5,2	0,83
Moyenne	44.d50.b2	309,43	21,51	11,32	1,9
Écart		129,66	8,55	5,53	0,91
Moyenne	44.d50.c1	276,94	26,83	13,55	1,98
Écart		153,99	14,59	6,6	0,82
Moyenne	44.d50.c2	277,95	20,52	10,69	1,92
Écart		179,39	10,85	6,61	0,95
Moyenne	44.d50.d1	306,65	23,9	12,01	1,99
Écart		188,08	14	6,88	0,77
Moyenne	44.d50.d2	291,9	25,86	13,39	1,93
Écart		183,97	11,4	6,68	0,9
Moyenne	44.d50.e1	305,11	22,89	10,85	2,11
Écart		127,36	8,7	5,22	0,79
Moyenne	44.d50.e2	299,27	23,96	13,24	1,81
Écart		141,06	9,29	4,77	1,09
Moyenne	44.d50.f1	282,55	26,92	12,18	2,21
Écart		142,6	10,75	5,17	0,95
Moyenne	44.d50.f2	305,5	19,19	11,22	1,71
Écart		146,15	9,5	5,65	0,92
Moyenne	44.d50.g1	294,21	25,04	13,46	1,86
Écart		128,42	8,56	5,37	0,7
Moyenne	44.d50.g2	315,43	25,44	12,85	1,98
Écart		177,34	11,68	5,99	0,99
Moyenne	44.d50.h1	296,38	23,48	13,19	1,78
Écart		144,65	8,61	5,79	0,7
Moyenne	44.d50.h2	317,6	25,93	12,9	2,01
Écart		114,37	8,18	4,75	0,92
Moyenne	44.d50.h3	282,44	23,5	12,37	1,9
Écart		199,21	12,23	7,3	0,81
Moyenne	44.d50.i1	304,2	24,4	11,62	2,1
Écart		128,63	9,48	4,88	0,93
Moyenne	44.d50.i2	286,32	24,74	12,01	2,06
Écart		130,42	9,97	4,92	0,85

Tableau A.6.45. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 45.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	45.d50.a1	292,33	19,76	9,5	2,08
Écart		179,65	10,76	5,21	0,79
Moyenne	45.d50.b1	308,82	17,98	8,77	2,05
Écart		192,67	10,39	4,92	0,75
Moyenne	45.d50.b2	311,17	18,31	9,2	1,99
Écart		174,44	10,83	6	0,77
Moyenne	45.d50.c1	309,39	17,84	8,11	2,2
Écart		162,5	10,5	4,91	0,84
Moyenne	45.d50.d1	296,74	21,32	9,6	2,22
Écart		159,56	16,54	8,56	0,82
Moyenne	45.d50.e1	281,5	19,14	8,82	2,17
Écart		123,73	13,3	6,67	0,83
Moyenne	45.d50.e2	257,52	19,35	9,26	2,09
Écart		147,96	10,99	5,82	0,87
Moyenne	45.d50.f1	309,49	17,37	8,23	2,11
Écart		168,04	8,22	5,33	0,87
Moyenne	45.d50.f2	302,56	15,9	7,87	2,02
Écart		140,26	8,13	4,45	0,75

Tableau A.6.46. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 46.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	46.d50.a1	311,48	26,75	13,51	1,98
Écart		127,04	9,47	5,14	0,95
Moyenne	46.d50.a2	296,51	26,02	13,14	1,98
Écart		116,39	8,48	4,9	0,88
Moyenne	46.d50.b1	294,77	25,19	11,77	2,14
Écart		180,21	14,04	6,3	0,94
Moyenne	46.d50.b2	312,99	26,36	11,98	2,2
Écart		144,38	10,14	5,32	0,94
Moyenne	46.d50.c1	297,29	25,42	12,28	2,07
Écart		123,3	8,91	4,68	0,88
Moyenne	46.d50.c2	298,5	25,68	12,97	1,98
Écart		120,21	8,69	4,88	0,84
Moyenne	46.d50.d1	294,79	24,9	11,97	2,08
Écart		206,88	13,82	6,71	0,83
Moyenne	46.d50.d2	318,17	24,9	12,39	2,01
Écart		131,38	9,64	4,99	1,02
Moyenne	46.d50.e1	286,46	22,13	11,12	1,99
Écart		120,29	9,61	4,93	0,91
Moyenne	46.d50.e2	288,69	21,79	10,95	1,99
Écart		167,43	13,24	5,21	0,83
Moyenne	46.d50.f1	305,96	24,86	12,31	2,02
Écart		194,87	11,52	7,1	0,81
Moyenne	46.d50.f2	299,95	22,26	11,13	2
Écart		171,68	11,63	6,54	0,99
Moyenne	46.d50.g1	293,84	22,36	12,22	1,83
Écart		164,34	11,98	5,09	0,81
Moyenne	46.d50.h1	308,26	22,12	11,23	1,97
Écart		187,78	11,95	6,83	0,89
Moyenne	46.d50.i1	290,77	20,1	9,18	2,19
Écart		164	9,21	5,97	0,89
Moyenne	46.d50.i2	314,53	22,13	9,75	2,27
Écart		145,3	10,02	5,8	1,08

Tableau A.6.47. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 47.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	47.d50.a1	266,47	20,08	9,38	2,14
Écart		129,96	12,64	5,72	0,91
Moyenne	47.d50.b1	314,36	19,64	8,76	2,24
Écart		167,26	12,26	5,07	1,05
Moyenne	47.d50.b2	278,49	17,09	8,57	1,99
Écart		172,22	9,49	5,13	0,82
Moyenne	47.d50.c1	307,74	16,81	7,84	2,14
Écart		171,43	8,78	3,96	0,97
Moyenne	47.d50.d1	297,81	19,99	8,79	2,27
Écart		170,61	10,31	5,04	1,01
Moyenne	47.d50.e1	319,02	19,52	8,79	2,22
Écart		184,82	9,45	4,39	0,96
Moyenne	47.d50.e2	304,67	18,92	8,68	2,18
Écart		153,5	8,82	4,56	0,93
Moyenne	47.d50.f1	293,71	18,77	8,85	2,12
Écart		133,6	9,21	5,14	0,79
Moyenne	47.d50.f2	317,93	17,38	8,52	2,04
Écart		138,86	9,53	4,78	0,79

Tableau A.6.48. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 48.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	48.d50.a1	291,91	23,24	10,71	2,17
Écart		166,62	11,95	5,47	0,88
Moyenne	48.d50.a2	307,98	25,81	12,06	2,14
Écart		132,55	9,55	5,15	1,05
Moyenne	48.d50.b1	284,52	23,66	10,07	2,35
Écart		143,21	9,45	5,63	1,07
Moyenne	48.d50.b2	291,65	23,24	10,66	2,18
Écart		145,45	9,8	5,57	1,1
Moyenne	48.d50.c1	283,66	24,63	10,71	2,3
Écart		184,94	12,45	6,08	1,14
Moyenne	48.d50.c2	301,83	18,62	9,31	2
Écart		148,89	9,72	5,5	0,83
Moyenne	48.d50.d1	280,87	22,71	9,92	2,29
Écart		135,63	8,68	4,93	0,89
Moyenne	48.d50.d2	278,55	21,83	10,06	2,17
Écart		137,81	9,4	5,01	1,01
Moyenne	48.d50.e1	319,55	26,19	11,05	2,37
Écart		125,51	8,83	4,62	0,97
Moyenne	48.d50.e2	311,42	23,25	11,07	2,1
Écart		143,02	11,38	4,84	0,89
Moyenne	48.d50.f1	281,84	22,21	10,14	2,19
Écart		137,77	10,09	5,41	0,93
Moyenne	48.d50.f2	300,91	22,15	10,16	2,18
Écart		134,71	10,38	4,91	0,97
Moyenne	48.d50.g1	269,98	22,24	10,49	2,12
Écart		125,69	8,64	5,26	0,94
Moyenne	48.d50.h1	308,63	22,65	9,89	2,29
Écart		148,84	10	5,29	1,1
Moyenne	48.d50.h2	281,2	23,61	10,93	2,16
Écart		172,1	11,76	6,27	1,04
Moyenne	48.d50.i1	293,9	20,57	9,06	2,27
Écart		113,68	9,54	4,5	1,11
Moyenne	48.d50.i2	319,56	21,33	9,74	2,19
Écart		135,64	10,17	5,28	1,06

Tableau A.6.49. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 49.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	49.d50.a1	307,87	17,54	7,9	2,22
Écart		184,13	9,45	5,76	0,93
Moyenne	49.d50.b1	290,65	19,32	8,55	2,26
Écart		172,17	8,51	4,97	0,94
Moyenne	49.d50.b2	275,74	18,08	7,86	2,3
Écart		193,75	8,08	3,78	0,9
Moyenne	49.d50.c1	287,91	17,13	8,12	2,11
Écart		184,67	6,65	3,81	0,78
Moyenne	49.d50.c2	311,43	18,41	8,33	2,21
Écart		173,89	8,72	4,42	0,91
Moyenne	49.d50.d1	280,28	23,11	10,04	2,3
Écart		195,91	16,1	6,63	1,05
Moyenne	49.d50.d2	309,29	19,52	8,27	2,36
Écart		159,68	11,2	5,41	1,25
Moyenne	49.d50.e1	316,41	19,6	8,71	2,25
Écart		183,24	8,56	5,04	0,89
Moyenne	49.d50.e2	292,83	19,6	8,56	2,29
Écart		137,88	10,6	5,71	0,91
Moyenne	49.d50.f1	267,24	17,41	7,95	2,19
Écart		189,75	7,12	4,06	0,99
Moyenne	49.d50.f2	279,72	18,34	8,3	2,21
Écart		191,89	6,71	4,37	0,95

Tableau A.6.50. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 50.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	50.d50.a1	278,53	20,77	9,53	2,18
Écart		114,55	8,93	4,58	1,06
Moyenne	50.d50.a2	262,96	19,93	9,49	2,1
Écart		102,38	7,55	4,69	1,03
Moyenne	50.d50.b1	283,28	22,29	9,57	2,33
Écart		192,22	7,82	3,92	0,96
Moyenne	50.d50.b2	277	20,11	9,44	2,13
Écart		196,53	7,45	3,95	0,8
Moyenne	50.d50.c1	306,6	20,2	8,94	2,26
Écart		189,08	7,11	4,07	0,97
Moyenne	50.d50.c2	272,99	17,66	7,92	2,23
Écart		184,33	6,87	3,86	1,06
Moyenne	50.d50.d1	304,6	19,6	8,79	2,23
Écart		149,36	7,67	3,73	1,45
Moyenne	50.d50.d2	308,06	18,24	8,33	2,19
Écart		191,13	7,29	4,17	1,14
Moyenne	50.d50.e1	260,53	20,17	8,2	2,46
Écart		106,63	8,61	4,14	1,25
Moyenne	50.d50.e2	299,08	18,94	9,02	2,1
Écart		119,44	7,55	4,16	1,01
Moyenne	50.d50.f1	292,1	21,22	9,87	2,15
Écart		135,01	8,94	5,43	0,98
Moyenne	50.d50.f2	281,27	19,95	9,28	2,15
Écart		142,04	8,44	4,96	0,94
Moyenne	50.d50.g1	310,61	18,11	8,23	2,2
Écart		114,78	6,37	3,94	1,07
Moyenne	50.d50.g2	291,21	19,26	9,49	2,03
Écart		103,65	7,96	4,16	0,91
Moyenne	50.d50.h1	305,71	20,5	9,11	2,25
Écart		108,47	8,19	4,77	0,95
Moyenne	50.d50.h2	276,31	19,69	8,83	2,23
Écart		104,42	7,54	4,63	1,11
Moyenne	50.d50.i1	297,12	20,31	8,06	2,52
Écart		189,67	8,95	4,41	1,2
Moyenne	50.d50.i2	280,5	19,99	8,69	2,3
Écart		128,23	7,72	4,14	0,99

Tableau A.6.51. : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes calculées pour l'échantillon 51.

	Objet	Aire [pixels]	Axe max. [pixels]	Axe min. [pixels]	Facteur Forme
Moyenne	51.d50.a1	267,78	18,77	8,53	2,2
Écart		166,44	7,98	4,36	0,85
Moyenne	51.d50.a2	317,63	18,9	8,75	2,16
Écart		184,58	7,27	4,45	0,9
Moyenne	51.d50.b1	277,06	18,71	7,96	2,35
Écart		173,31	7	3,84	0,98
Moyenne	51.d50.b2	310,49	19,23	8,47	2,27
Écart		195,22	7,28	4,1	0,8
Moyenne	51.d50.c1	271,42	18,3	8,32	2,2
Écart		165,3	6,94	3,96	1,01
Moyenne	51.d50.c2	307,04	18,59	8,26	2,25
Écart		192,11	7,8	3,96	0,95
Moyenne	51.d50.c3	300,48	17,2	7,32	2,35
Écart		152,19	7,04	3,62	0,91
Moyenne	51.d50.d1	271,05	17,42	7,17	2,43
Écart		181,85	8,68	3,57	0,95
Moyenne	51.d50.e1	299,92	19,78	8,79	2,25
Écart		190,42	8,78	4,72	1,07
Moyenne	51.d50.e2	283,62	18,28	8,27	2,21
Écart		139,24	6,95	4,23	1
Moyenne	51.d50.f1	320,79	19,45	8,92	2,18
Écart		192,64	7,71	4,51	1,04