Compaction isostatique d'un explosif agrégataire

D. Picart, P. Gilormini

► To cite this version:

D. Picart, P. Gilormini. Compaction isostatique d'un explosif agrégataire. Journal de Physique IV Proceedings, 1993, 03 (C7), pp.C7-1573-C7-1576. 10.1051/jp4:19937246 . jpa-00251884

HAL Id: jpa-00251884

<https://hal.science/jpa-00251884>

Submitted on 1 Jan 1993

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Compaction isostatique d'un explosif agrégataire

D. PICART et P. GILORMINI*

Commissariat à l'Energie Atomique, Le Ripault, 37260 Monts, France

** Laboratoire de Mécanique et Technologie, ENS de Cachan, CNRS, Université Paris VI, 61 av. Pdt Wilson, 94230 Cachan, France*

Abstract

The compaction process which transforms an explosive powder into a quasi-compact material is studied to determine the resulting microscopic field of void volume fraction. We have performed quasi-static isostatic compaction with a pressing tool developed especially for this application. The behavior is simulated with a hollow sphere model using an elastic viscoplastic power law for the solid fraction. The resulting constitutive law has been implemented in the finite element code ABAQUS which is used to simulate the forming process.

Introduction

Cette étude concerne la modélisation du comportement d'un agrégat organique explosif, décrit dans la première partie de cet article, et la simulation de la compaction isostatique de ce matériau. Les motivations de ce travail sont triples :

- (i) comprendre les mécanismes de déformation microscopiques agissant lors de la compaction,
- (ii) observer les concentrations de contrainte pouvant fragiliser les pièces fabriquées ou mener à un incident pyrotechnique,
- (iii) simuler la compaction et calculer les cartes d'isodensités des ébauches compactées. En effet, la densité intervient à la fois sur la vitesse de détonation, sur les mécanismes de transition combustion-détonation ainsi que sur la propagation spatiale de l'onde de choc au sein du matériau explosif après l'initiation de la réaction.

Sur le thème de la mise en forme des compositions explosives, peu d'articles peuvent être répertoriés. On trouve généralement des modèles empiriques [1][2] ou unidimensionnels [3]. Ces articles portent plus particulièrement sur l'influence du coefficient de frottement entre la composition explosive et le moule métallique employé lors de la compression en matrice fermée. Ce travail constitue donc une première approche de la mise en forme isostatique d'un explosif à liant thermoplastique. Pour cela, nous présentons l'enceinte isostatique développée lors de cette étude afin d'obtenir les courbes pression-changement de volume de l'agrégat à tout instant de la compaction, la loi de comportement formulée pour ce matériau et une simulation de la compaction réalisée avec le code de calcul ABAQUS.

1. Le matériau

Le matériau étudié est constitué de cristaux et d'un liant thermoplastique. Le cristal moyen est un cylindre de longueur 50 à 100 μm , de section hexagonale de diamètre 10 à 30 μm . Ces faibles dimensions impliquent que le comportement de ce constituant ne peut être observé directement. Les cristaux sont agglomérés avec le liant par un procédé chimique afin de former des particules sphériques de diamètre moyen 0,5 à 1 mm . Le liant forme alors la croûte extérieure de ces particules alors que les cristaux sont disposés aléatoirement à l'intérieur. Les billes sont ensuite introduites dans un sac de moulage constitué d'un élastomère placé dans une presse isostatique industrielle à la température de 140°C afin de fluidifier le liant. La mise en forme est réalisée par l'application de trois cycles de pression maximale constante égale à 200 MPa.

Avant la compaction, la fraction volumique des vides est de 30 à 40% et trois niveaux de porosité peuvent être distingués : (i) la microporosité des cristaux, (ii) la porosité entre les cristaux dans les billes et (iii) entre les billes. Une étude de la microstructure du matériau obtenue après la compaction montre que seule une fraction de la microporosité des cristaux n'est pas éliminée. Cette fraction de la porosité totale f , supposée constante quel que soit le chargement appliqué, est notée f_m ($f = f_m + f^*$).

2. Les essais isostatiques

Les essais isostatiques sont réalisés à l'aide d'une enceinte de compression développée spécialement pour cette étude (fig. 1). Le principe est celui d'une presse à piston plongeur. La pression isostatique est transmise à l'agrégat par l'huile contenue dans l'enceinte, soumise à l'action du piston lui-même mis en mouvement par une machine de traction-compression uniaxiale. Le changement de volume de l'agrégat est alors relié au déplacement du piston, la pression interne est mesurée par un capteur de pression positionné sur le piston et la température est obtenue par les thermocouples introduit dans l'enceinte par un passage étanche pratiqué dans le fond du moule. Les capacités maximales de cet outillage sont de 300 MPa et de 200°C, et la précision absolue est de 0,015 sur le changement de volume.

Les courbes expérimentales obtenues lors de la compression isostatique de la composition explosive laissent apparaître deux zones lors de la première charge. Lorsque le matériau est proche de l'état pulvérulent de porosité f_0 , le changement de volume est rapide et conduit à $\log(V/V_0) = 0,30$ dès 10 MPa. Ensuite, les déformations volumiques ralentissent progressivement et tendent finalement vers une asymptote de pente déterminée par le comportement du matériau compact. Le changement de volume maximum est voisin de 0,45 lorsque la pression est de 200 MPa. Si la pression est relâchée, le retour est non linéaire et le changement de volume résiduel est de 0,40. Nous n'avons pas constaté de boucle d'hystérésis lors de l'application de plusieurs cycles de compression. Par contre, si la pression est maintenue à sa valeur maximale, un comportement visqueux peut être observé, ce fluage étant d'autant moins marqué que la pression est grande. Enfin, l'application de plusieurs cycles de compaction permet d'augmenter la densité finale du matériau.

3. Modélisation et simulations

Le modèle que nous avons formulé est basé uniquement sur l'observation des résultats d'essais isostatiques mais permet de simuler d'autres états de contrainte. La loi de comportement macroscopique tridimensionnelle est obtenue par l'intermédiaire du modèle des sphères composites de Hashin [4] que nous étendons de façon heuristique au cas des grandes porosités.

Nous supposons la décomposition additive du taux de déformation total $\mathbf{D}$ en un taux de déformation élastique $\mathbf{D}^e$ et un taux de déformation plastique $\mathbf{D}^p$. La part élastique du comportement est décrite par une loi hypoélastique

$$\overset{\nabla}{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{K} \mathbf{D}^e \quad \text{soit} \quad \dot{p} = K D_v^e \quad \overset{\nabla}{\boldsymbol{\sigma}}^d = 2G \mathbf{D}^{ed} \quad (1)$$

où $\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur des contraintes de Cauchy, de déviateur $\boldsymbol{\sigma}^d$ et tel que $p = \text{Trace}(\boldsymbol{\sigma})/3$. La notation $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\sigma}}$ désigne la dérivée de Jaumann. La trace et le déviateur du taux de déformation élastique sont notés D_v^e et $\mathbf{D}^{ed}$ alors que $\mathbf{K}$ est l'opérateur tangent de Hooke formé des modules élastiques de compressibilité K et de cisaillement G . Nous supposons que le coefficient de Poisson ν de l'agrégat est constant et est égal au coefficient de Poisson de la matrice ν_m constituée des cristaux microporeux et du liant. Ce coefficient est mesuré sur le matériau quasi-compact et vaut 0,47. Pour le module de compressibilité K , nous utilisons la solution de la sphère creuse soumise à une pression isostatique extérieure pour une fraction solide élastique non-linéaire avec $\nu = \nu_m = 0,47$ et $K_m = K^0(p/p_a)^r$ où p_a est la pression atmosphérique. Le module de compressibilité macroscopique est alors

$$\frac{K}{K^0} = \left(1 - f^* \frac{3(1 - \nu_m)}{2(1 - 2\nu_m) + (1 + \nu_m)f^*} \right) \left(\frac{p}{p_a} \right)^r \quad (2)$$

Le comportement viscoplastique des matériaux poreux a suscité jusqu'ici de nombreux articles [5][6][7]. Parmi les différents potentiels viscoplastiques énoncés, nous choisissons celui de Sofronis et McMeeking qui possède la particularité de retrouver la solution de la sphère creuse soumise à une pression isostatique externe pour une fraction solide décrite par la loi de Norton [8]. Le taux de déformation plastique est alors

Figure 1 : Schéma de principe de la presse à piston plongeur développée lors de cette étude.

Figure 2 : Maillage initial de la poudre (en gris foncé) et du sac de moulage (a), et répartition de la porosité résiduelle (b) après un cycle de compaction isostatique de pression maximale 200 MPa.

$$Dp = \frac{\dot{\varepsilon}_0}{\sigma_0^n} (A \sigma_{eq}^2 + B p^2)^{(n-1)/2} \left[\frac{3}{2} \frac{A}{\sigma^d} + \frac{B}{3} p \right] \quad (3)$$

$$A = \left(\frac{1 + f^*}{1 - f^*} \right)^{2n/(n+1)} \quad B = \frac{9}{4} \left(\frac{f^*}{n^n (1 - f^{*1/n})} \right)^{2/(n+1)} \quad (4)$$

Enfin, la conservation de la masse permet de connaître l'évolution de f^* en fonction du taux de déformation plastique volumique $D_v p$ en négligeant le taux de déformation élastique volumique.

Le modèle est étendue au cas des grandes porosités afin d'obtenir des taux de déformation élastiques et plastiques importants lorsque $f^* = f_o^*$. Pour cela, nous supposons que le module de compressibilité élastique macroscopique est nul pour $f^* = f_o^*$ en remplaçant f^* par f^*/f_o^* dans l'équation (2) et que l'exposant viscoplastique n est fonction de la porosité du matériau sous la forme

$$n = n_1 + (n_0 - 1) \frac{\log(1 + m f^*)}{\log(1 + m f_o^*)} \quad (5)$$

L'identification des paramètres de ce comportement conduit à $K^0 = 4364$ MPa, $r = 0,082$ avec $v_m = 0,47$ et pour la partie plastique du comportement : $\dot{\varepsilon}_0 = 0,59 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$, $\sigma_0 = 0,82 \cdot 10^{-3}$ MPa, $n_0 = 57$, $n_1 = 2,14$ et $m = -2,86$.

Cette loi de comportement, introduite dans le code de calcul ABAQUS, nous permet de simuler la compaction d'un explosif. Le comportement de l'élastomère du sac de moulage est supposé hypoélastique de module de compressibilité égal à 530 MPa et de coefficient de Poisson 0,3. La répartition de la porosité résiduelle f^* obtenue après un cycle de compression isostatique de pression maximale 200 MPa est comprise entre 1,22 et 1,29% (fig. 2b), la densité maximale étant obtenue sous le bouchon du sac de moulage. Au cœur de l'échantillon, le matériau est plus homogène car la fraction volumique des vides est comprise entre 1,28 et 1,29%. Ce procédé de mise en forme permet donc d'obtenir des échantillons de densité homogène si les extrémités des pièces comprimées sont ensuite usinées.

Conclusion

La loi de comportement que nous venons de formuler est basée sur le modèle des sphères creuses de Hashin étendu de manière heuristique au cas des grandes porosités. Cette modélisation permet de simuler les procédés de mise en forme des poudres explosives lorsque l'état de contrainte local est proche d'un chargement isostatique. Ce modèle ne s'applique donc plus avec autant de fiabilité pour les méthodes de compaction nécessitant un moule de confinement qui introduit, par l'intermédiaire des frottements, des états locaux de cisaillement. Pour cela, nous poursuivons actuellement cette étude afin d'observer et de modéliser la réponse d'un échantillon quelle que soit la triaxialité des contraintes.

- [1] SABMANNSHAUSEN U., ESSIG W. and OSSWALD T.A., 1989, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* **14** (1989) 24.
- [2] ESSIG W., OSSWALD T.A. and SABMANNSHAUSEN U., *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* **16** (1991) 73.
- [3] ELBAN W.L., *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* **9**, (1984) 119.
- [4] HASHIN Z., *J. Appl. Mech.* **29** (1962) 143.
- [5] DUVA J.M. and HUTCHINSON J.W., *Mechanics of Materials* **3** (1984) 41.
- [6] COCKS A., *J. Mech. Phys. Solids* **37** (1989) 693.
- [7] SOFRONIS P. and McMEEKING R.M., *J. Applied Mech.* **59** (1992) S88.
- [8] WILKINSON D.S. and ASHBY M.F., *Acta Met.* **23** (1975) 1277.