

## Fatigue des empilements de sphères creuses en nickel

O.Caty<sup>1</sup>, E.Maire<sup>1</sup>, R.Bouchet<sup>2</sup>, Y.Brechet<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire MATEIS INSA de Lyon, UMR CNRS 5510, F69621 VILLEURBANNE Cedex

<sup>2</sup> ONERA-DMMP, BP72 - 29 avenue de la division Leclerc, F92322 CHATILLON Cedex

<sup>3</sup> Laboratoire LTPCM INPG Grenoble, 1130 rue de la piscine, BP75, F38402 SAINT MARTIN D'HERES  
olivier.caty@insa-lyon.fr

### Résumé :

*Les empilements de sphères creuses sont formés à partir de billes creuses métalliques liées par frittage ou brasage. Le matériau cellulaire ainsi obtenu possède une structure régulière et permet une remarquable flexibilité en termes d'optimisation microstructurale. On peut ainsi faire varier l'épaisseur et le diamètre des sphères, la nature du métal utilisé (Nickel, Acier...) ainsi que le type d'empilement (aléatoire, cubique face centré, cubique simple...) afin d'obtenir les propriétés désirées. Cette étude a pour but de déterminer et modéliser l'effet de ces paramètres sur les propriétés en fatigue. Les modes d'endommagement sont étudiés par microtomographie aux rayons X. Les images 3D servent aussi de base à des maillages éléments finis permettant de décrire la phase d'amorçage en fatigue. Des empilements numériques permettent enfin de générer artificiellement le matériau et de découpler l'effet des paramètres.*

### Abstract :

*Metal hollow spheres can be piled up and stick or soldered together to form a cellular metal. This kind of material is rather homogeneous and allows a remarkable flexibility in terms of microstructural design. The thickness and diameter of spheres, the nature of the metal used (Nickel, steel...), the pattern for the pile up (random, centred face cubic, simple cubic...) can be varied in order to reach the target properties. This study aims at determining and modeling the effects of the parameters on the fatigue properties. Mechanisms responsible for the fatigue degradation of the material under study are determined by X ray microtomography. These 3D images are also used for a finite element computation to describe the crack initiation step. At least, hollow spheres numerically piled allow us to build an artificial material in order to separate parameters effect.*

### Mots-clefs :

**Sphères creuses ; fatigue; tomographie**

## 1 Introduction

L'utilisation des matériaux cellulaires métalliques a été suggérée par les performances des matériaux naturels comme les os ou le bois. Les métaux cellulaires combinent les avantages des métaux à ceux des structures réelles. Le CNRS et l'ONERA se sont donc associés pour développement des matériaux cellulaires métalliques multifonctionnels par une approche basée sur la modélisation dite de « material by design » (projet MAPO). Il est ainsi nécessaire de proposer des modèles en fonction des paramètres clefs de la microstructure (nature du métal utilisé, taille de cellule, épaisseurs...) et du type de sollicitation.

Les empilements de sphères creuses, de part leur structure particulièrement régulière et contrôlable permettent une grande flexibilité en terme de développement. En faisant varier des paramètres comme l'épaisseur et le diamètre des sphères, la nature du métal ainsi que le type d'empilement on peut optimiser la microstructure afin d'obtenir des propriétés spécifiques et

diverses. Mais avant de pouvoir réaliser un matériau sur mesure, il est nécessaire de connaître les propriétés en fonction des divers paramètres. Cette étude a donc pour objectif de mesurer, comprendre et modéliser le comportement en fatigue de ce matériau structuré.

Ce travail s'est donc attaché à dans un premier temps caractériser le matériau à divers échelles aussi bien par microscopie que par microtomographie aux rayons X. Les essais de fatigue ont ensuite permis de déterminer les modes d'endommagement par visualisation 3D. Ces observations ont menées au développement de calculs éléments finis utilisant les maillages à partir des images s'attachant à modéliser la phase d'amorçage. D'autres modèles utilisant des empilements numériques recrées artificiellement un matériau parfaitement contrôlable afin d'étudier aisément l'effet des différents paramètres.

## 2 Caractérisation des empilements réels

Deux types d'empilements ont été utilisés pour cette étude, ils utilisent des procédés radicalement différents. Les assemblages en Nickel sont fabriqués à partir de sphères creuses produites par déposé chimique de Nickel sur un mandrin en polystyrène expansé préalablement recouvert de cuivre. Ces sphères sont ensuite vidées du polystyrène par fusion et dégazage. Leur assemblage passe ensuite par un déposé de Nickel Bore qui est porté à fusion tandis que les billes restent solides. L'interaction des différents matériaux crée une hétérogénéité importante des propriétés dans les parois des billes.

L'autre solution, plus récemment étudiée, utilise le frittage de poudres d'acier inoxydable de type 25Cr20Ni. Des billes de polystyrène expansé recouvertes de poudre d'acier inoxydable sont empilées gravitairement dans un moule puis pressées et chauffées. Le matériau obtenu est plus régulier avec de nombreuses microporosités.

### 2.1 Analyse du matériau constitutif au M.E.B.

L'analyse par Microscopie Electronique à Balayage (M.E.B.) est présentée pour les empilements en Nickel. Ce travail a d'abord été mené sur un dispositif classique ne permettant pas le dosage du Bore (FIG. 1).

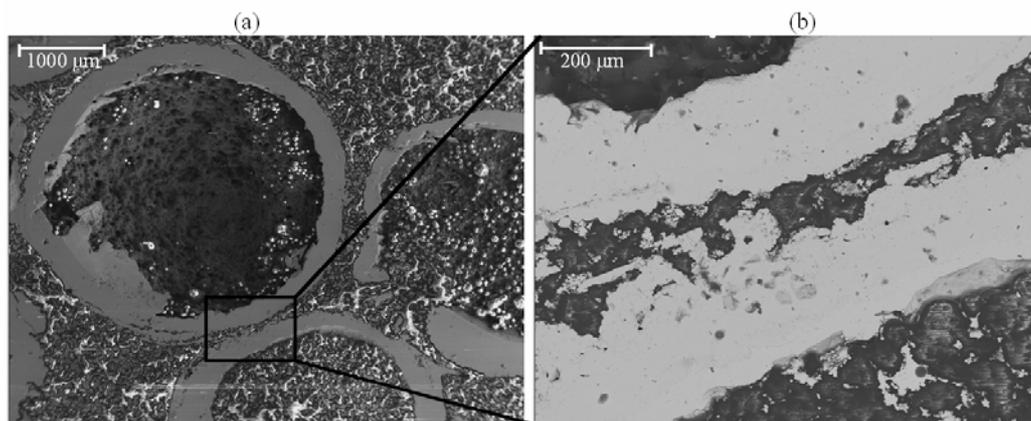


FIG. 1 – Images MEB d'un empilement de sphères creuses en Nickel + Nickel Bore  
(a) Aux électrons secondaires (x20) (b) Etude du col de liaison aux électrons rétrodiffusés grossissement (x120).

Cette première étude montre de nombreuses porosités dans les parois des billes ainsi que des traces de Silicium provenant de pollutions lors de la fabrication à l'extérieur des sphères. Ce travail a été complété par une analyse sur un M.E.B. environnemental permettant le dosage du Bore ( $Z=5$ ). Une attaque avec une base forte a permis de révéler la structure granulaire des zones de brazure (Ni+NiB). La FIG. 2 montre cette zone ainsi qu'un grossissement et son analyse EDX.

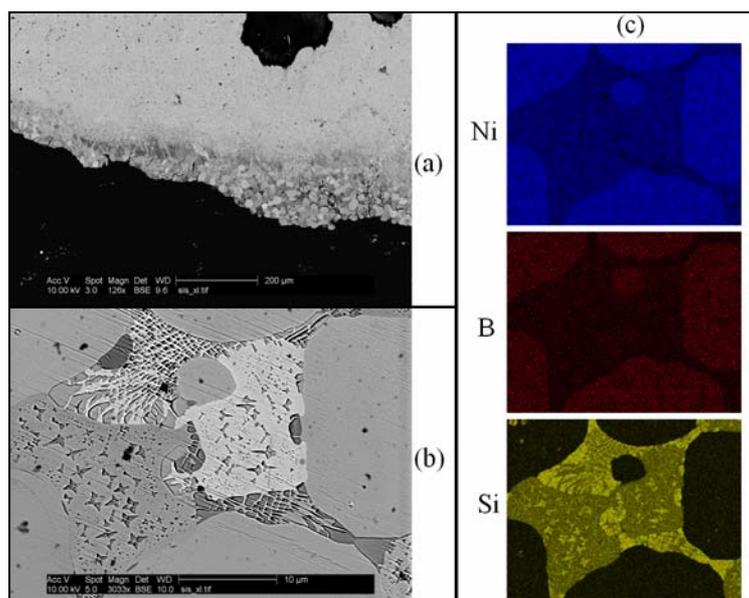


FIG. 2 – (a) Micrographie d'une bille, la zone granulaire correspond à la brasure en NiB. (b) Grains de brasure. (c) Analyse EDX des grains.

L'analyse EDX de ces zones montre une forte concentration en Nickel et Bore mais aussi en Silicium. Les grains dendritiques étant beaucoup plus riche en silicium que les zones en NiB monophasées. Cette étude est actuellement étendue aux empilements en acier inoxydable et sera présentée dans l'exposé.

Parallèlement des mesures de micro modules d'Young par Nanoindentation ont été réalisées dans les parois des billes. Ces mesures ont montrées de très fortes hétérogénéités des propriétés élastiques étroitement liées à la composition chimique de la bille. Ces mesures permettent d'alimenter les modèles éléments finis présentés au paragraphe 4.

## 2.2 Etude des empilements par Tomographie aux rayon X

La tomographie aux rayons X est une méthode permettant de révéler l'architecture tridimensionnelle des empilements. En particulier, par analyse des images, on peut retrouver les positions des sphères, leur diamètre ainsi que l'épaisseur des parois. Ces analyses menées sur l'échantillon de fatigue, donnent pour les 65 billes non coupées un diamètre de sphère compris entre 2.3 et 3.3 mm ainsi que des épaisseurs de parois entre 100  $\mu\text{m}$  et 180  $\mu\text{m}$ . Les images réalisées à l'ESRF et au laboratoire MATEIS servent de base pour des maillages éléments finis visibles sur la FIG. 3.

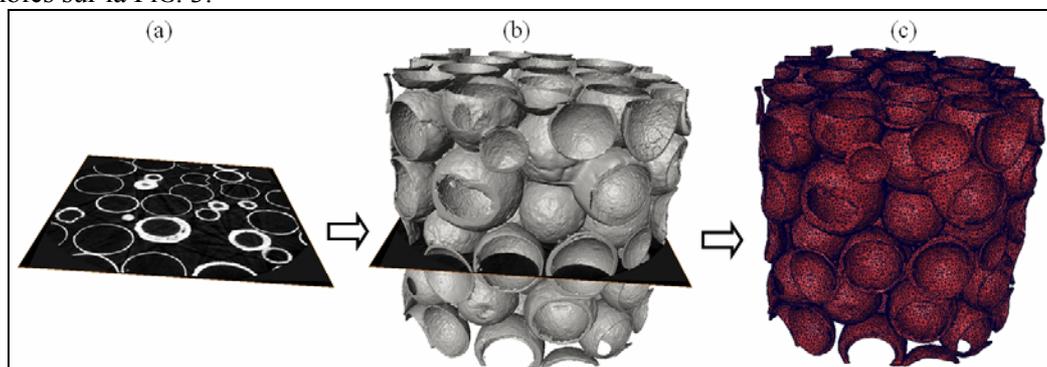


FIG. 3 – (a) Coupe tomographique de l'empilement de sphères creuses en Nickel + Nickel Bore. (b) Rendu volumique de l'empilement. (c) Maillage tétraédrique réalisé à partir de l'image 3D.

Le maillage réalisé avec le logiciel Amira comprend 919 333 éléments et 278 060 nœuds. Ce type de modèle permet ensuite de réaliser des calculs éléments finis (EF) avec différents codes.

### 3 Essais de fatigue

L'essai de fatigue ici présenté a pour objectif premier d'observer et comprendre les mécanismes de ruine mis en jeu en fatigue. Il s'agit d'un essai de interrompu régulièrement avec démontage de l'échantillon pour observation par tomographie aux rayons X. L'essai a été réalisé en compression/compression ( $R=10$ ) sous chargement sinusoïdal à 25 Hz, la contrainte moyenne ramenée à la section était de -1.3 MPa ( $\sigma_{\max} = -0.25$  MPa,  $\sigma_{\min} = -2.5$  MPa). Quatre images 3D de l'empilement à quatre états de déformation ont été acquises. La FIG. 4 montre l'évolution d'une coupe de l'empilement choisie pour son état d'endommagement remarquable.

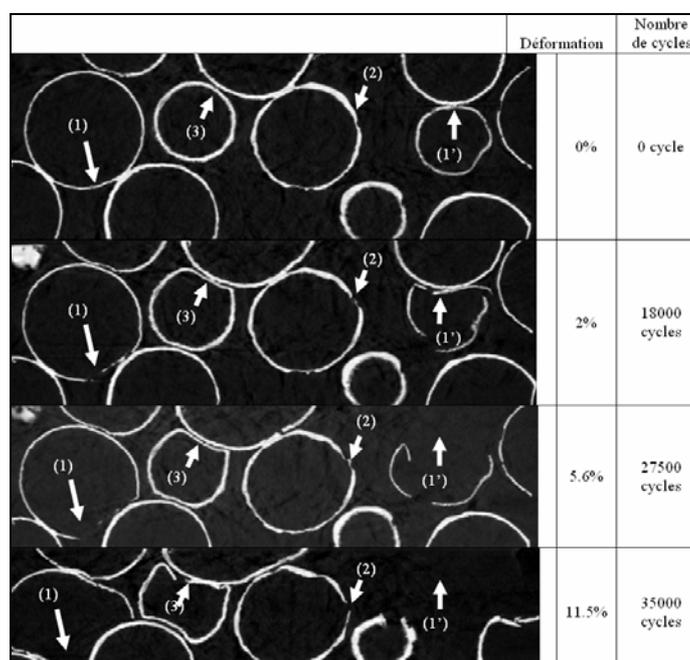


FIG. 4 – Visualisation des mécanismes d'endommagement en fatigue des empilements de sphères creuses en Ni+NiB observés sur des coupes obtenues par tomographie aux rayons X.

Ces images permettent d'illustrer les différents modes de ruine observés sur les empilements de sphères creuses en Ni+NiB. Il s'agit d'une combinaison des phénomènes décrits pour l'ensemble des matériaux cellulaires dans l'ouvrage « Metal Foams, a design guide » de Ashby *et Al* (2000). Sur la FIG. 4, les zones (1) et (3) montrent des mécanismes de rupture par flexion des parois. Ceci est le phénomène majoritaire, mais d'autres phénomènes, comme la rupture des cols amenant la séparation d'une bille (zone 1') ainsi que des ruptures par flambement en compression (zone 2) participent à la ruine du matériau. Des mesures de limite de fatigue sont actuellement en cours et devraient permettre de tracer prochainement une courbe de Whöler. Ces résultats seront présentés lors de l'exposé.

### 4 Modèles

Il a été choisi d'effectuer le calcul d'amorçage en deux étapes comme le suggèrent les ouvrages de Lemaître et Chaboche (2001) et Bathias et Bâillon (1997). Dans un premier temps, un calcul EF à partir des images permet de connaître la contrainte et la déformation du matériau

en tout point de la structure. Le ou les points critiques où risque de s'amorcer une fissure peuvent alors être déterminés. Il suffit ensuite d'appliquer un critère de limite d'endurance pour déterminer la durée de vie en fatigue de l'empilement.

Les calculs EF mis en place sont de deux types. Ils sont réalisés soit directement à partir des maillages issus des images tomographiques (FIG. 3), soit à partir de maillage d'images d'empilements gravitaires générés numériquement (FIG. 5).

#### 4.1 Génération d'empilements gravitaires numériques

Les modèles numériques d'empilements gravitaires permettent d'étudier facilement l'effet des paramètres d'empilements (comme le type d'empilement, les défauts générés artificiellement, les dimensions des billes, les tailles de volume...) sur les propriétés mécaniques.

Les empilements sont générés par un programme fournissant des fichiers au format texte des coordonnées des centres ainsi que des rayons des sphères. Ce fichier est ensuite traité pour former des images au format voxels d'empilements de sphères creuses liées par des cols. La FIG. 5 résume les étapes de fabrication de ces empilements et un calcul éléments finis réalisé sur une éprouvette de fatigue constituée de sphères creuses.

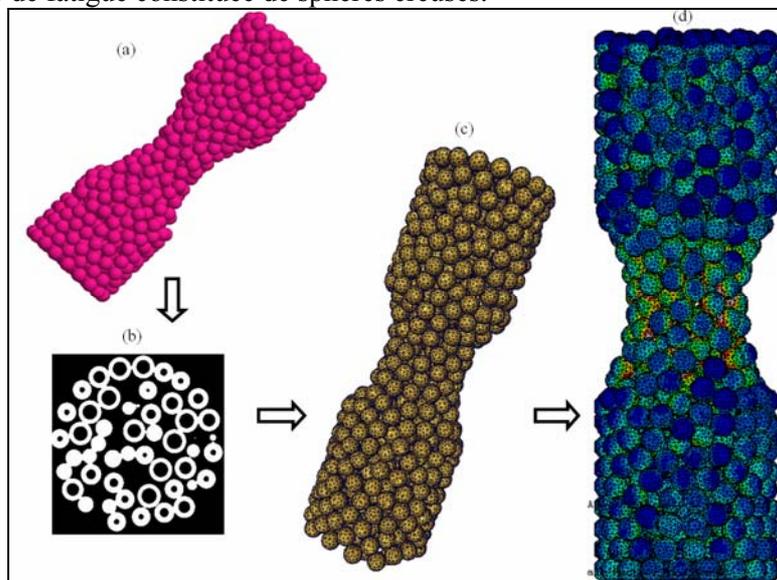


FIG. 5 – Résumé des étapes de construction d'un calcul EF à partir d'images d'empilements générées numériquement (a) Visualisation de l'empilement gravitaire numérique. (b) Coupe de l'empilement lié. (c) Maillage EF réalisé à partir de l'image (d) Calcul EF en élasticité linéaire (Abaqus standard), observation des isocontraintes de Von Mises.

Le calcul EF permet, par exemple, de mettre en évidence la concentration de contrainte dans le rayon de raccordement d'une éprouvette de traction/compression. La concentration maximale se produit au niveau d'un défaut d'empilement (zone peu dense) et proche d'un col de liaison.

#### 4.2 Simulation EF à partir des images de tomographie

Les données de tomographie ont permis de réaliser des maillages d'images réelles d'empilements de sphères creuses en Ni+NiB. Ces calculs ont alors pu être confrontés à des essais réels de compression monotone et des essais de compression/compression (R=10) en fatigue. Les données en monotone ont permis de caler les constantes du matériau à imposer pour avoir un comportement proche des courbes de compression. La FIG. 6 montre les résultats d'un

calcul de compression sur l'éprouvette sollicitée en fatigue. Le calcul permet de se rendre compte des zones de concentration de contrainte où la rupture a le plus de chance de se produire. Les points chauds en contrainte correspondent bien aux zones d'amorçage de fissures, des illustrations et données complémentaires seront proposées lors de l'exposé.

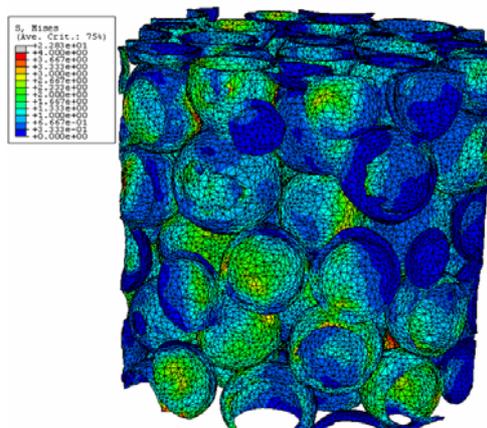


FIG. 6 : Résultats de calculs EF à partir des images de tomographie : cartes des isocontraintes de Von Mises.

## 5 Conclusion

L'étude en fatigue du comportement des empilements de sphères creuses est rendue complexe d'une part par l'empilement qui est de type gravitaire et d'autre part par les très fortes hétérogénéités du matériau constitutif. Ces deux paramètres sont étudiés séparément et intégrés dans les modèles éléments finis en cours de développement.

Parallèlement, l'utilisation de la microtomographie aux rayons X a permis de comprendre les modes de ruine et de développer un modèle éléments finis le plus proche possible de l'empilement réel.

L'exposé présentera de nouveaux développements réalisés, en particulier la partie expérimentale sera plus complète avec différents matériaux constitutifs, différents diamètres et épaisseurs de parois et différents modes de sollicitation. Toutes ces données devraient permettre une modélisation plus fine du comportement en fatigue des empilements.

## Références

- MOTZ C., FRIEDL O., PIPPAN R. Fatigue crack propagation in cellular metals. *International Journal of Fatigue*, 2005.
- LEMAITRE J., CHABOCHE J.L. Mécanique des matériaux solides. *Editions DUNOD*, 2001, 2nd édition.
- ASHBY M., EVANS A., FLECK N., GIBSON L., HUTCHINSON J., WADLEY H., "Metal Foams, A Design Guide" *Edition BH* (2000).
- BATHIAS C., BAÏLON J.P., "La fatigue des matériaux et des structures". *Editions HERMES 2nd édition* (1997).
- DANG VAN K., GRIVEAU B., MESSAGE O., "A new multiaxial fatigue limit criterion : theory and applications". *Biaxial and Multiaxial fatigue* (1982), pp 479-496.