



**HAL**  
open science

## Imagerie par tomographie X pour la caractérisation microstructurale de combustibles UO<sub>2</sub>

J. Meynard, M. Garajeu, R. Masson, Michel Bornert, C. Duguay, A. Monnier

► **To cite this version:**

J. Meynard, M. Garajeu, R. Masson, Michel Bornert, C. Duguay, et al.. Imagerie par tomographie X pour la caractérisation microstructurale de combustibles UO<sub>2</sub>. Quatrièmes Journées Matériaux Numériques, Jun 2019, Amboise, France. cea-02614123

**HAL Id: cea-02614123**

**<https://cea.hal.science/cea-02614123v1>**

Submitted on 20 May 2020

**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.

# Imagerie par tomographie X pour la caractérisation microstructurale de combustibles $UO_2$

Joane Meynard<sup>1</sup>, Michel Bornert<sup>2</sup>, Arnaud Monnier<sup>1</sup>, Christelle Duguay<sup>1</sup>, Mihail Garajeu<sup>3</sup> et  
Renaud Masson<sup>1</sup>

[arnaud.monnier@cea.fr](mailto:arnaud.monnier@cea.fr)

<sup>1</sup> DEC, CEA Cadarache, 13018 Saint-Paul-lez-Durance

<sup>2</sup> Laboratoire Navier, Université Paris Est, Ecole des Ponts ParisTech, 77455, Marne-la-Vallée

<sup>3</sup> LMA, Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, F-13453, Marseille

## Résumé

Les céramiques de dioxyde d'uranium ( $UO_2$ ) sont utilisées comme combustible pour les Réacteurs à Eau Pressurisée du parc électronucléaire français. La microstructure poreuse de ces combustibles peut être représentée par une famille de pores de forme quasi-sphérique et un réseau de pores de type filamentaire. Cette microstructure est pilotée par le procédé de fabrication des combustibles  $UO_2$ .

L'objectif de cette étude est d'évaluer la microstructure 3D de ces matériaux par tomographie X. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la caractérisation de l'influence de la microstructure sur la conductivité thermique de ces combustibles  $UO_2$ .

L'obtention par tomographie X d'images exploitables reste complexe pour ces échantillons très absorbants (densité théorique de  $10,97 \text{ g/cm}^3$ ). A l'aide de deux campagnes de tomographie menées au laboratoire Navier, le réseau de porosité d'échantillons  $UO_2$  a pu être observé. Une caractérisation des différentes familles de porosité a été réalisée à partir des images traitées.

## Spécificités du protocole expérimental

Plusieurs expériences de tomographie ont déjà été réalisées sur des combustibles nucléaires afin d'observer par exemple la morphologie de grains de poudre [1], leur structure cristallographique [2] et des défauts de surface [3]. Cependant, la recherche bibliographique réalisée par les auteurs n'a pas mis en exergue d'expérience de tomographie effectuée afin de caractériser de façon non destructive la microstructure 3D d'échantillons d' $UO_2$ . Grâce à la ligne 160 kV du laboratoire Navier, il a été possible de visualiser la microstructure d'échantillons ayant une taille de l'ordre de  $0,6 \times 0,6 \times 2 \text{ mm}^3$  avec une résolution de  $0,8 \text{ }\mu\text{m}$  par voxel. La figure 1 présente des coupes brutes obtenues par tomographie d'un échantillon d'étude.

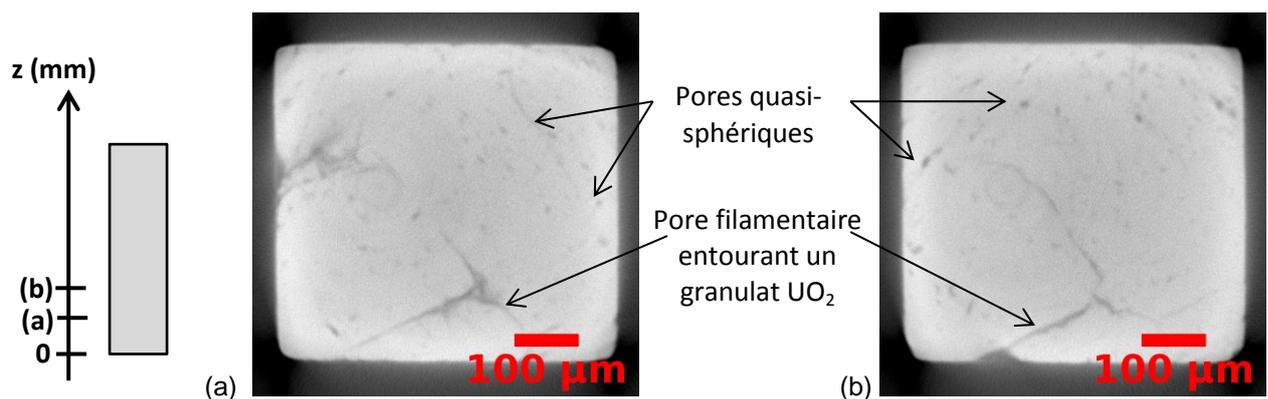


Figure 1 - Evolution de la porosité sur différentes coupes d'un échantillon d'étude : (a)  $z = 0,36 \text{ mm}$  et (b)  $z = 0,40 \text{ mm}$

Il est possible d'observer deux familles de porosité présentes dans le matériau: des pores quasi-sphériques et un réseau de pores de type filamentaire. Les pores filamenteux apparaissent comme interconnectés dans le volume d'étude et entourent des granules d' $UO_2$ . Les images obtenues par tomographie X sont traitées par analyse d'images afin de caractériser ces deux familles de pores présentes dans le combustible  $UO_2$  d'étude.

## Caractérisation 3D de la microstructure des combustibles d'étude

Dans un premier temps, les porosités sont isolées de la matrice  $UO_2$  par analyse d'images sur les coupes obtenues par tomographie. En se basant sur les différences morphologiques des deux familles de porosité, il a été choisi d'isoler ces familles à l'aide d'un critère de compacité  $C$  [4] défini comme :

$$C = \frac{36 \pi V^2}{A^3}$$

où  $V$  est le volume de l'objet étudié et  $A$  son aire.  $C$  est maximal pour une sphère et vaut 1 dans ce cas.

Après une étude de classification basée sur ce critère, les pores filamenteux ont été considérés comme étant les objets présents dans le matériau avec une compacité  $C$  inférieure à 0,05. La figure 2 présente une reconstruction 3D permettant un bon isolement des deux familles de pores.

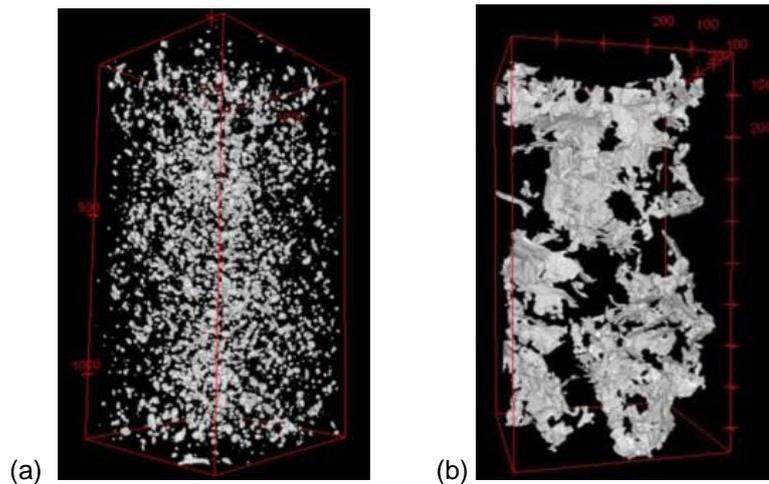


Figure 2 – Classification des objets présents dans l'échantillon d'étude : (a) pores quasi-sphériques et (b) pores filamenteux

Grâce à cette caractérisation, il est possible d'observer la distribution aléatoire ainsi que la forme et la taille des pores sphériques. Pour ce qui est des pores filamenteux, il y en a trop peu dans le volume caractérisé pour en déduire des caractéristiques statistiquement représentatives.

En conclusion, cette étude montre qu'il est possible de caractériser par tomographie X, à l'aide de la ligne 160 kV du laboratoire Navier, la porosité d'échantillons  $UO_2$  ayant un volume de l'ordre de  $0,6 \times 0,6 \times 2 \text{ mm}^3$  avec une résolution de  $0,8 \text{ }\mu\text{m}$  par voxel. De plus, cette étude a permis de caractériser en 3D la morphologie des pores quasi-sphériques présents dans ce matériau. Par la suite, une étude numérique est envisagée afin d'évaluer l'influence de la porosité quasi-sphérique sur la conductivité thermique des combustibles étudiés (calculs par « Fast Fourier Transform » sur les volumes reconstruits).

## Références

- [1] J. Lechelle et al., «Micro-XANES and X-ray microtomography study of oxidation state, morphology, and chemistry evolution during nuclear fuel sintering,» *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, n° 14, pp. 1657-1661, 2004.
- [2] C. Schroer et al. , «High-resolution 3D imaging microscopy using hard X-rays,» *MRS Bulletin*, vol. 29, n° 13, pp. 157-165, 2004.
- [3] P. Lekeaka-Takunju et al., «Assessment of nuclear fuel pellets using X-ray tomography,» *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 33, n° 13-4, pp. 1267-1272, 2010.
- [4] H. M. Ballard et al., *Computer Vision*, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1982.