

Modélisation du comportement effectif du combustible MOX par une analyse micromécanique en champs de transformation non uniformes

R. Largeton¹, J-C. Michel², P. Suquet²

¹ MMC, EDF R&D Site des Renardières, France, rodrigue.largeton@edf.fr

² LMA, CNRS Marseille, France, {michel,suquet}@lma.cnrs-mrs.fr

Deux types de combustibles sont actuellement irradiés dans les Réacteurs à Eau Pressurisée français :

- le combustible à base de dioxyde d'uranium, nommé l' UO_2 ,
- et le MOX , acronyme anglais de Mixed Oxide car il combine de l'oxyde de plutonium et de l'oxyde d'uranium.

Diverses caractéristiques du MOX font que son comportement sous irradiation diffère de celui de l' UO_2 . Parmi ces points, nous pouvons citer l'**hétérogénéité de ce combustible en répartition de plutonium**. En effet, dans un **MOX MIMAS ADU** on observe actuellement **trois phases** (Cf. figure 1) :

1. une phase inclusionnaire à forte concentration en plutonium (25 à 30 % de teneur massique moyenne), nommée les **amas plutonifères**,
2. une autre phase inclusionnaire à faible teneur en plutonium (inférieure à 1 % de teneur massique moyenne), nommée les **amas uranifères**,
3. et une phase d'**enrobage** à teneur modérée en plutonium (environ 6 à 8 % de teneur massique moyenne).

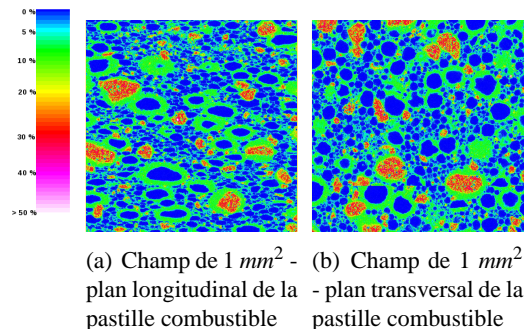


FIG. 1 – Cartographie du pourcentage de teneur massique en plutonium - MOX MIMAS ADU

flement solide.

Pour homogénéiser ce problème local, nous avons choisi une méthode d'analyse par champs de transformation non uniformes (abrégé anglais NTFA (Cf. ref. [1])). Avec cette approche, la déformation locale visqueuse en un point \underline{x} du VER MOX et en fonction de t , est définie par :

$$\underline{\underline{\epsilon}}^{vp}(\underline{x}, t) = \sum_{k=1}^M \underline{\underline{\mu}}^k(\underline{x}) \epsilon_k^{vp}(t) \quad (2)$$

avec :

- $\underline{\underline{\mu}}^k(\underline{x})$ un ensemble de champs tensoriels non uniformes, appelés **modes plastiques**. Le choix des modes plastiques est réalisé sous différents chargements élémentaires. La sélection des modes les plus pertinents est effectuée par la transformée de *Karhunen-Loève*.
- $\epsilon_k^{vp}(t)$ la déformation viscoplastique associée au mode k .

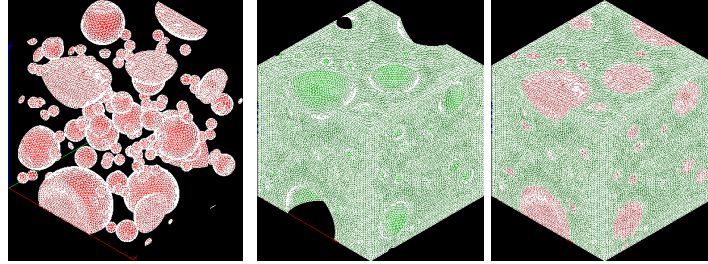
Avec cette approximation (2), on passe d'un nombre infini de variables internes qui étaient tensorielles à un nombre fini M de variables scalaires. La déformation locale libre en un point \underline{x} du VER MOX et en fonction de t , est elle définie par :

$$\underline{\underline{\varepsilon}}^{gs}(\underline{x}, t) = \sum_{r=1}^N \chi^{(r)}(\underline{x}) \underline{\underline{i}} \varepsilon_r^{gs}(t) \quad (3)$$

avec :

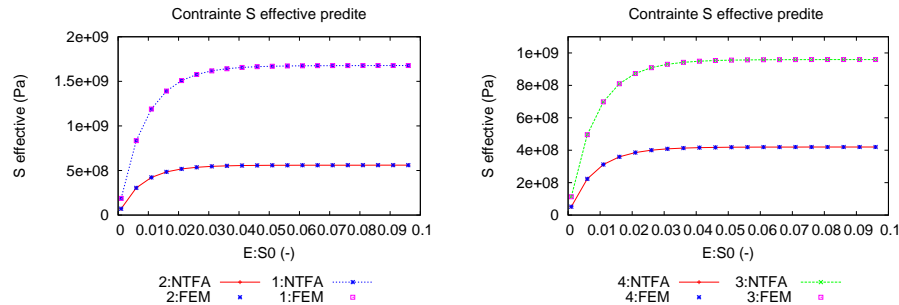
- $\chi^{(r)}(\underline{x})$ la fonction caractéristique associée à la phase r et $\underline{\underline{i}}$ le tenseur identité d'ordre 2.
- $\varepsilon_r^{gs}(t)$ la déformation libre scalaire uniforme associée à la phase r .

Dans ce document nous présentons donc les résultats de ce modèle NTFA sur des microstructures tridimensionnelles bi ou tri-phasées représentatives du combustible MOX (Cf. figures 2 et 3). En amont de ces travaux, des outils permettant de représenter géométriquement et numériquement le MOX en 3D ont été développés. Ces travaux sont détaillés dans [2].



(a) Maillage des inclusions - amas plutonifère (b) Maillage Matrice incluant l'enrobage et MOX bi-phasé les amas uranifères (c) Maillage du verre MOX bi-phasé les amas uranifères

FIG. 2 – Maillage périodique du combustible MOX en 3D - Tétraèdres quadratiques



(a) Chargements pour identification des modes
 - 1 : $S_0 = \Sigma^{(1)}$ traction 11
 - 2 : $S_0 = \Sigma^{(2)}$ cisaillement 12
 (b) Chargements hors identification des modes
 - 3 : $S_0 = \Sigma^{(1)} + \frac{1}{2}\Sigma^{(2)}$
 - 4 : $S_0 = \Sigma^{(1)} + \Sigma^{(2)}$

FIG. 3 – Essai d'écroutissage (vitesse = $0.01s^{-1}$) à direction de contrainte imposée S_0 sur la microstructure de la figure 2 (Comportement visco-élastique linéaire) - Comparaison contrainte macroscopique prédite par FEM et NTFA

Références bibliographiques

[1] J.C Michel, P. Suquet. *Nonuniform Transformation Field Analysis*, International Journal of Solids and Structures, volume 40, page 6937-6955, 2003

[2] R. Largeton, V. Blanc, P. Thevenin, D. Baron. *Simulation and modelling the heterogeneous effects of microstructure MOX fuels on their effective properties in nominal pressure water reactor conditions*, CIMTEC 5th Forum on New Materials session FF5-L05, 2010