

# Modélisation 3D par élément discret de céramiques projetées plasma à l'échelle de la porosité sous sollicitation dynamique

V. Longchamp<sup>1,3</sup>, J. Girardot<sup>1</sup>, D. André<sup>2</sup>, F. Malaise<sup>3</sup>, I. Iordanoff<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arts et Métiers Science et Technologie, I2M, UMR CNRS 5295, 33400 Talence, {vincent.longchamp, jeremie.girardot, ivan.iordanoff}@ensam.eu

<sup>2</sup> Université de Limoges, IRCER, UMR CNRS 7315, 87000 Limoges, damien.andre@unilim.fr

<sup>3</sup> CEA CESTA, 15 avenue des Sablières - CS60001, 33116 Le Barp cedex, France, {vincent.longchamp, frederic.malaise}@cea.fr

**Résumé** — Ce travail s'intéresse aux possibilités offertes par la méthode des éléments discrets pour modéliser, à l'échelle de la microstructure, des matériaux hétérogènes comme les céramiques projetées plasma. Une stratégie de création d'un domaine numérique 3D représentant la microstructure est proposée. Elle est fondée sur de l'analyse d'images : la porosité est détectée puis traitée selon son échelle, afin d'être reproduite au mieux dans le domaine discret. Des simulations dynamiques ont été réalisées avec ce modèle pour étudier l'effet de la microstructure lors de la propagation d'une onde de contrainte.

**Mots clés** — Méthode Éléments Discrets, Microstructure, Céramiques Projetées Plasma, Chocs

## 1 Introduction

Des revêtements céramiques de faible épaisseur sont souvent utilisés pour protéger des structures face à la corrosion, l'abrasion, la chaleur ou contre des impacts. Les applications sont nombreuses, notamment dans l'aéronautique ou sur de grandes installations scientifiques comme le *Laser Mega Joule* (LMJ), où certains composants font face à des conditions de température et de pression extrêmes [4].

Ces revêtements sont élaborés par *projection plasma* (APS) : une torche plasma est utilisée pour faire fondre et accélérer une poudre céramique vers le substrat. Lors de l'impact, les particules s'étalent et refroidissent pour former des lamelles (*cf.* Figure 1). La succession d'impacts conduit à la formation d'une microstructure complexe de type lamellaire, comportant des pores et des micro-fissures [8]. Celle-ci peut avoir des effets bénéfiques et par exemple favoriser l'atténuation des ondes de choc [7, 13].

Toutefois, l'étude expérimentale de ces mécanismes est relativement délicate compte tenu de l'échelle d'observation et de la rapidité des phénomènes à observer. Par conséquent, des représentations numériques à l'échelle *mésoscopique* sont développées pour mieux comprendre les phénomènes en jeu [5, 7, 9, 13]. Plus particulièrement, cette étude vise à comprendre l'influence de la microstructure sur les mécanismes de fissuration et de fragmentation. En effet, la compréhension fine du lien microstructure – macro-propriétés est essentielle pour une meilleure utilisation de ces revêtements.

La plupart des représentations numériques actuelles s'appuient sur la mécanique des milieux continus. Cette technique permet de simuler la propagation de quelques fissures dans un matériau initialement dépourvu de défauts. Cependant, elle n'est pas vraiment adaptée lorsqu'il s'agit de décrire un milieu initialement hétérogène (comportant des défauts), qui peut potentiellement se fragmenter. Cette étude s'intéresse à une approche numérique totalement différente : il s'agit de la *Méthode des Éléments Discrets* (MED), qui permet une gestion plus naturelle des phénomènes discontinus [2]. Aussi, elle a déjà démontré son aptitude à représenter les processus de fissuration en régime quasi-statique grâce à des représentations 2D de microstructures [5, 9]. Par ailleurs, la simulation de la propagation d'ondes de choc dans des matériaux poreux à structure idéalisée est également possible avec cette méthode [7, 13].

L'objet de notre étude est de passer à une représentation 3D de la microstructure réelle d'une céramique projetée plasma par le biais d'un modèle numérique aux éléments discrets. Pour cela, la microstructure sera identifiée à partir d'observations au MEB-FIB (Microscope Électronique à Balayage - Focused Ion Beam). Le matériau d'étude est une *Zircone Yttriée* (YSZ) obtenue à partir d'une poudre fondue-broyée dopée à 8% en masse molaire. Ensuite, la démarche à suivre pour construire un *Volume Élémentaire Statistique* (VES) en éléments discrets sera décrite. Enfin, les premiers résultats montrant l'interaction de la microstructure de ce VES avec une onde de compression seront présentés.

## 2 Identification de la microstructure

### 2.1 Technique MEB-FIB

Il existe plusieurs techniques d'observation de la matière à l'échelle microscopique permettant la reconstruction de volumes 3D. Parmi elles, le MEB-FIB a retenu notre attention. L'association d'un MEB et d'un FIB permet d'obtenir plusieurs micrographies (dans le plan  $xy$ ) à différentes profondeurs (coordonnées suivant la direction normale  $\vec{z}$ ) par ablation successive de couches de matière.

Cette technique permet d'atteindre de très bonnes résolutions : dans notre cas la taille des pixels est de 23,6 nm. Par ailleurs, le FIB est calibré pour ablater une épaisseur équivalente à la taille d'un pixel, ce qui permet d'obtenir des voxels cubiques. Ainsi, même les porosités les plus fines, comme les micro-fissures intra-lamellaires d'épaisseur inférieure au dixième de micromètre, sont visibles avec cette méthode d'observation.

La principale limitation du MEB-FIB concerne la taille de la fenêtre d'observation, celle-ci étant restreinte à quelques dizaines de micromètres. Dans notre cas, les images ont une dimension maximale de  $845 \times 597$  pixels et au total 898 images ont été prises. Cet ensemble d'images est appelé *stack* et il permet de former un volume de  $19,9 \times 14,1 \times 21,3 \mu\text{m}^3$ . Ce volume étant trop faible pour être représentatif du revêtement global, il est qualifié de *statistique*. De fait, plusieurs simulations sur des VES différents seront nécessaires pour obtenir des résultats représentatifs.

### 2.2 Différent défauts en présences

Une micrographie obtenue au MEB est présentée sur la Figure 2. Elle permet de distinguer plusieurs types de défauts caractéristiques des revêtements réalisés par projection plasma. Comme pour d'autres céramiques obtenues avec ce procédé, il est possible d'observer [8] :

- Des *macro-fissures inter-lamellaires*, dans le plan parallèle au substrat ;
- Des *micro-fissures intra-lamellaires*, dans des plans perpendiculaires au substrat ;
- Des *pores globulaires*.

Certains pores, comme celui observé en bas à gauche de la micrographie (*pullout*), sont liés à la préparation de l'échantillon et non à la microstructure initiale de la céramique.

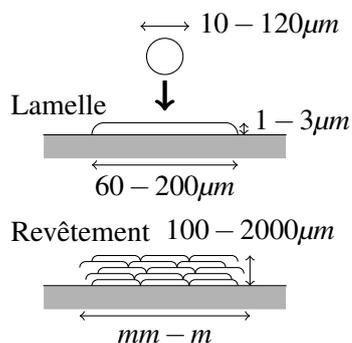


FIGURE 1 – Formation d'un revêtement APS

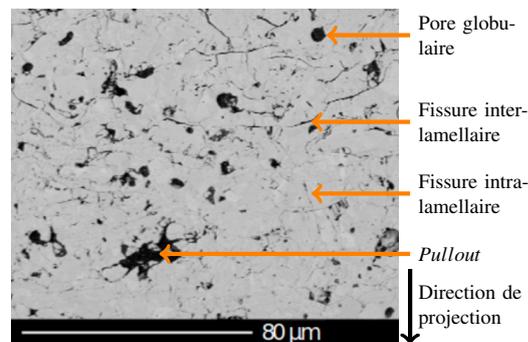


FIGURE 2 – Micrographie MEB d'une YSZ

### 2.3 Traitement des données MEB-FIB

Afin d'améliorer et de simplifier la détection de la porosité, il convient de commencer par une correction du jeu de données brutes, qui contient beaucoup d'artefacts. Quatre traitements d'images sont effectués grâce au logiciel *Avizo*, qui est adapté à la manipulation de données 3D obtenues par MEB-FIB :

- Alignement : Un algorithme d'alignement (basé sur la différence au sens des moindres carrés) est utilisé pour ajuster automatiquement chaque image par rapport aux autres afin d'éviter les décalages.
- Curtaining : Un filtre FFT (*Fast Fourier Transformation*) est utilisé pour supprimer les stries qui sont créées lors de l'ablation de la matière par le faisceau d'ions.

- **Bruit** : Un filtre (*Non-Local Means Filter*) est utilisé pour supprimer le bruit des images où l'exposition est la plus faible, sans altérer la netteté des interfaces matière/vide.
- **Exposition** : Une uniformisation de l'exposition des images est réalisée pour faciliter la détection des porosités.

La Figure 3a expose une images après cette étape d'amélioration.

Finalement, après ces traitements, le *stack* est constitué de 884 images de dimension  $746 \times 561$  pixels, soit un volume de dimension  $17,61 \times 13,24 \times 20,86 \mu\text{m}^3$ .

Ensuite, la séparation de la matière et des porosités est effectuée à l'aide d'un seuil en niveau de gris (étape 0). Le niveau du seuil est choisi à partir de l'histogramme de la distribution des niveaux de gris. Il en résulte des images binaires N&B avec les pores en noir et la matière en blanc (Figure 3b).

Enfin, la séparation des macro-porosités ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) et des micro-porosités ( $\sim 0,1 \mu\text{m}$ ) se fait par étapes, suivant un protocole similaire à celui utilisé par Antou [3] :

Étape 1 : Un processus de *dilatation* suivi d'une *érosion* de la matière sont effectués. Cela a pour effet de faire disparaître les fissures les plus fines tout en conservant la taille initiale des pores. L'intensité des fonctions est fixée à 5 pixels. Cela signifie que toutes les porosités de moins de 10 pixels ( $\sim 0,24 \mu\text{m}$ ) de large sont supprimées.

Étape 2 : L'image binaire initiale (étape 0) est couplée (opérateur booléen « ou ») avec celle issue de l'étape précédente afin de retrouver la géométrie réelle des macro-porosités (Figure 3c).

Étape 3 : L'image issue de l'étape précédente (A) est soustraite à l'image binaire initiale (B) : cela correspond aux opérations booléennes « (non A) ou B ». Il en résulte une image contenant toutes les porosités de l'image originale sans les macro-porosités obtenues à l'étape 2, c'est-à-dire qu'il ne reste que les micro-porosités.

Étape 4 : Un algorithme *skeletonize* est appliqué à l'image issue de l'étape 3. La taille des fissures est alors réduite à un pixel d'épaisseur (Figure 3d). L'information sur l'épaisseur des fissures est alors perdue, ce qui n'est pas un inconvénient puisque seule l'information sur leur position sera nécessaire pour les représenter dans le domaine discret.

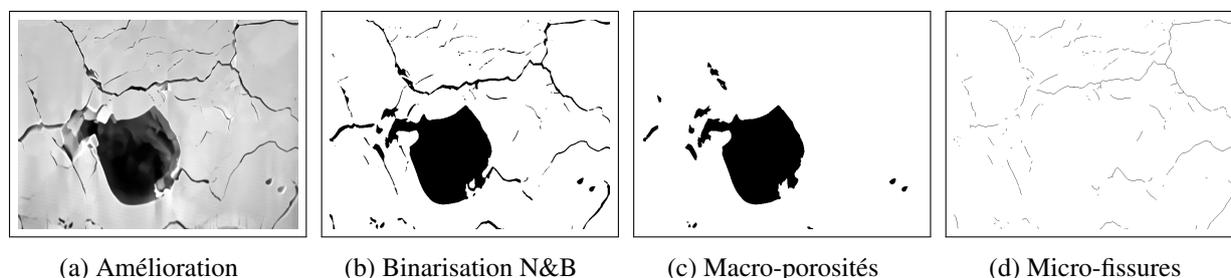


FIGURE 3 – Exemple de l'effet des différents traitements sur l'image 250

### 3 Représentation de la microstructure dans un VES

#### 3.1 Méthode des éléments discrets

La Méthode des Éléments Discrets (MED ou DEM pour *Discret Element Method*) est une méthode numérique inspirée des modèles particulaires dans lesquelles le milieu est constitué d'un ensemble de particules. Pour s'étendre aux milieux continus, cette approche numérique requiert l'ajout de liaisons cohésives entre les éléments, de manière analogue aux modèles de type lattice.

L'introduction de discontinuités dans un domaine discret est assez simple, en comparaison avec des méthodes continues qui doivent passer par un maillage complet du milieu. En effet, il suffit en théorie, de modifier les liens pour représenter des interfaces ou des phases différentes, et de supprimer des éléments pour représenter des pores ou des fissures. Pour la porosité, suivant les approches considérées, soit des groupes d'éléments sont supprimés aléatoirement jusqu'à l'obtention du taux de porosité voulu [7, 13],

soit une étape de traitement d'images est effectuée pour détecter les porosités afin de les représenter en supprimant les éléments coïncidents avec leurs positions [5, 9].

De plus, un autre intérêt de la MED repose sur la gestion plus naturelle de phénomènes discontinus tels que la micro-fissuration. Les stratégies de modélisation consistent à activer la suppression des liens ou des éléments à partir de critères de rupture. L'initiation et la propagation de fissures résultent alors de la suppression successive de liens et/ou d'éléments [2].

Enfin, la méthode permet de gérer de façon naturelle les contacts, ce qui s'avère utile pour prendre en compte les frottements induits entre les lèvres de fissures sollicitées en compression/cisaillement.

Il existe plusieurs codes de calcul permettant d'effectuer des simulations aux éléments discrets. Notre choix s'est porté sur le code de calcul *GranOO* développé entre l'I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie), l'IRCER (Institut de Recherche sur les Céramiques) et le LAMIH (Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines). Ce code utilise le modèle des poutres d'Euler-Bernoulli pour représenter les liaisons cohésives, qui permettent de transmettre les efforts et moments de réactions entre les éléments aux extrémités [1].

### 3.2 Représentation des pores et des micro-fissures

L'objectif de cette étude est de modéliser la microstructure d'une céramique projetée plasma en utilisant la méthode des éléments discrets et les observations 3D réalisées au MEB-FIB. Pour cela, une démarche permettant de représenter au mieux les défauts dans le domaine discret, tout en minimisant le nombre total d'éléments nécessaires, a été mise en place. Le processus global est représenté en Figure 4.

Comme les fissures intra-lamellaires sont quasiment fermées à l'état initial, il est compliqué de les représenter en supprimant des éléments, sous peine de devoir utiliser des éléments très petits et donc très nombreux. Ainsi, une distinction est réalisée entre :

- Les *pores et macro-fissures* ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ), représentés en supprimant les éléments correspondants ;
- Les *micro-fissures* ( $\sim 0,1 \mu\text{m}$ ), représentées en supprimant ou modifiant les liens qu'elles intersectent.

Cela permet de s'affranchir de la contrainte sur la taille des éléments : il n'est pas nécessaire d'avoir une taille d'élément inférieure à la taille des micro-fissures. Cependant, avec cette représentation, les micro-fissures sont initialement fermées (*ie.* elles ont une épaisseur nulle) ce qui ne correspond pas exactement à la réalité.

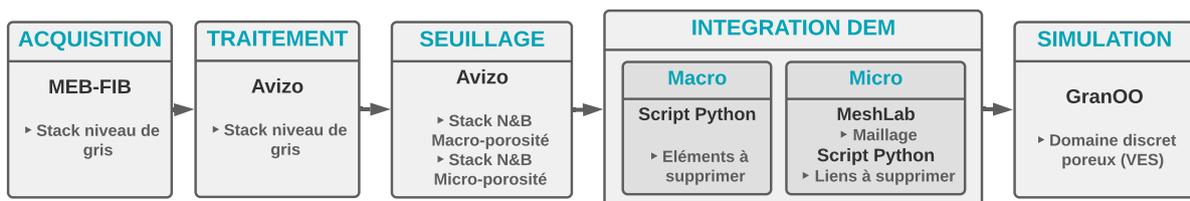


FIGURE 4 – Processus de représentation de la microstructure dans un domaine DEM

### 3.3 Génération du VES

L'étape initiale de construction du VES consiste à générer un domaine discret « dense » aux dimensions de la zone observée par MEB-FIB. Cette opération est effectuée avec les outils mis à disposition par GranOO. Le rayon moyen des éléments est fixé à  $0,2 \mu\text{m}$ , ce qui conduit à un domaine discret compact constitué de 92 196 éléments, reliés par 279 525 liens. Le nombre de coordination moyen est alors d'environ 6,2.

La création des macro-porosités est réalisée en supprimant tous les éléments dont les coordonnées coïncident avec un voxel noir du domaine issu de l'étape 2 (*cf.* Figure 3c). Cette détection est réalisée à l'aide d'un code dédié et conduit à la suppression de 5 361 éléments (visibles en Figure 5a). Le taux de porosité est alors de 5,81%. L'écart relatif avec le taux de porosité calculé avec le logiciel Avizo (5,88%) n'est que de 1%. Ce résultat permet de valider les choix de modélisation effectués pour la représentation des macroporosités.

La création des micro-fissures est quant à elle plus complexe, car elle nécessite la détection de tous les liens qui intersectent une surface de fissures. Cela requiert la création en amont de surfaces représentatives des plans de fissures. Pour cela, un ensemble de points, correspondant aux voxels noirs du stack issu de l'étape 4 (cf. Figure 3d) est extrait. Une reconstruction 3D des surfaces est réalisée à partir de ce nuage de points en utilisant l'algorithme de triangulation *Alpha Shape* du logiciel *MeshLab*. Ensuite, un code dédié permet de détecter toutes les intersections entre les liens du domaine discret (des segments) et la surface des micro-fissures (des triangles), à l'aide d'un algorithme de détection d'interférences géométriques optimisé nommé *Linked Cell Method* (LCM) [11].

Cette étape nécessite l'initialisation des plus de 9 millions de triangles qui composent la surface, soit environ 16 Go de mémoire vive. Et, bien que la recherche d'intersections avec les liens soit optimisée, elle n'est pas parallélisée et reste assez longue (plus d'une centaine d'heures de calcul).

Finalement, ce sont 23 310 liens, visibles en Figure 5b, qui sont supprimés pour créer les micro-fissures.

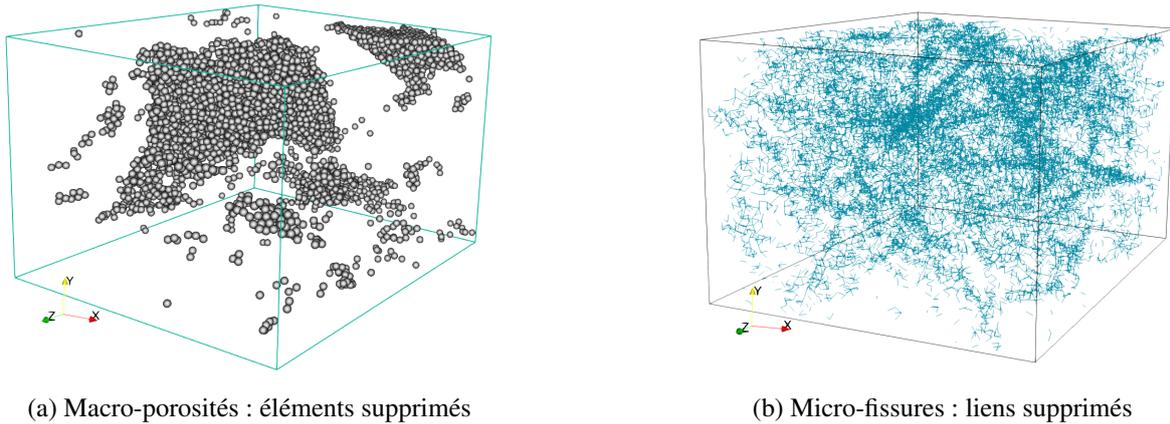


FIGURE 5 – Introduction des porosités et fissures dans le domaine discret

Cette méthode d'analyse permet de reproduire par éléments discrets la microstructure réelle d'une céramique projetée plasma. La partie suivante s'intéresse à la simulation de la propagation d'une onde de contrainte dans ce VES.

## 4 Application : Réponse de la microstructure face à une onde de contrainte

### 4.1 Position du problème

L'objectif ici est de simuler la propagation d'une onde de compression plane dans un échantillon de Zirconium Yttrifié. Afin de tester le modèle, une rampe de compression est appliquée sur la face avant du VES en imposant la vitesse de celle-ci, de manière à obtenir une contrainte de l'ordre du gigapascal. De part l'orientation préférentielle des fissures, le comportement des revêtements est anisotrope [8]. La définition de l'orientation du VES dans le revêtement (Figure 6) est donc essentielle : les faces *avant* et *arrière* sont orthogonales à la direction de projection, la *face avant* étant dirigée vers la torche plasma, et la *face arrière* vers le substrat.

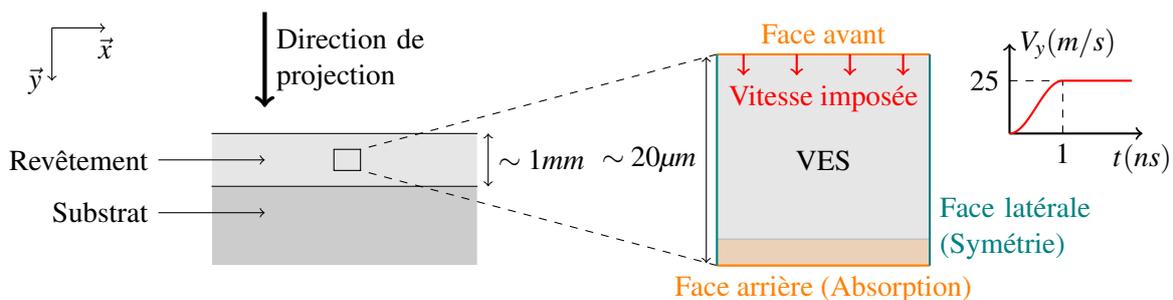


FIGURE 6 – Schéma 2D du VES, conditions aux limites et orientation dans le revêtement

## 4.2 Identification des paramètres

Avant l'introduction de la porosité dans le VES, il est nécessaire de calibrer les paramètres microscopiques du modèle MED. Une étude paramétrique [6] est réalisée afin d'obtenir des paramètres macroscopiques de l'ordre de ceux d'une zircone dense ( $E = 220$  GPa,  $\nu = 0,3$  et  $\rho = 6000$  kg · m<sup>-3</sup> d'après [10]). Ces paramètres étant assez variables en fonction de la céramique et de sa phase, l'étape de calibration n'a pas été poussée jusqu'à leur reproduction exacte dans le domaine discret. Le Tableau 1 regroupe les valeurs des paramètres microscopiques (indice  $\mu$ , associés aux liens et éléments) du modèle à la suite de cette étape. Ils sont au nombre de quatre [1] : le module d'Young  $E$ , le coefficient de poisson  $\nu$ , la masse volumique  $\rho$  et le rapport  $r$  entre le rayon de la section circulaire des liens et celui des éléments. Les paramètres macroscopiques équivalents (indice  $m$ ) du domaine discret y sont également indiqués.

## 4.3 Conditions aux limites

Pour effectuer des simulations de propagation d'ondes, il est nécessaire de définir des conditions aux frontières du domaine. Le chargement est appliqué sur la face avant en imposant un profil sinusoïdale de vitesse matérielle passant de 0 à 25 m · s<sup>-1</sup> en 1 ns. La vitesse est ensuite maintenue constante à 25 m · s<sup>-1</sup> (cf. Figure 6). La contrainte calculée numériquement lors du passage de l'onde dans le VES est d'environ 1 GPa.

Dans le but d'assurer une propagation d'onde plane dans le VES et de limiter les effets des détentes provenant des bords, des conditions de symétrie ou de périodicité sont couramment utilisées dans la littérature [7, 13]. Similairement, des conditions de symétrie sont appliquées sur les bords latéraux du domaine. Celles-ci sont imposées en empêchant les déplacements suivant la normale à la surface et les rotations hors plan.

La plupart du temps, la *face arrière* des domaines simulés est une surface libre qui ne nécessite pas de traitement particulier. Dans le cas de notre VES, la face arrière est une interface non physique. Par conséquent, il faut empêcher les réflexions d'ondes sur celle-ci : une force d'amortissement visqueuse  $F_d$  est alors appliquée sur les éléments proches de la frontière afin d'absorber les ondes incidentes. L'expression de cette force, adaptée de celle proposée par Witell [12], est donnée par l'équation (1) :

$$F_d = -V_y \times \alpha \times \frac{M}{\Delta t} \times g(y) \quad \text{avec} \quad g(y) = \exp \left[ -w^{m-n} \frac{(w - (y - y_0))^n}{(y - y_0)^m} \right] \quad (1)$$

où  $V_y$  est la vitesse de la particule suivant  $\vec{y}$ ,  $\alpha \in [0, 1]$  le taux d'amortissement,  $M$  la masse moyenne d'un élément et  $\Delta t$  le pas de temps. L'application de la force dépend de la position  $y$  de l'élément par le biais de la fonction  $g$  qui est paramétrée par l'épaisseur de la zone d'amortissement  $w$ , la position du début de la zone d'amortissement  $y_0$ , et des paramètres de forme  $n$  et  $m$ .

Les valeurs des différents paramètres utilisés sont regroupées dans le Tableau 1.

Paramètres microscopiques				Paramètres macroscopiques			Paramètres d'amortissement			
$E_\mu$ (GPa)	$\nu_\mu$	$r$	$\rho_\mu$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_m$ (GPa)	$\nu_m$	$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$	$w$ ( $\mu$ m)	$m$	$n$
8 200	0,3	0,6	9 440	223	0,29	6 000	0,023	2	1	2,5

TABLEAU 1 – Paramètres du domaine discret

## 4.4 Analyse des résultats numériques

Pour illustrer les effets de la présence de pores et micro-fissures sur la propagation d'ondes, les profils de vitesses calculés en différents endroits du VES ont été tracés en Figure 7. Les éléments retenus pour ces tracés sont notés en orange sur la Figure 7a. Le VES a été rallongé de 2  $\mu$ m dans la direction de propagation de l'onde ( $\vec{y}$ ) pour pouvoir définir la zone d'absorption (en bleu) du côté de la face arrière.

Dans le VES dense (domaine compact initial), l'allure de la courbe n'est pas modifiée pendant la phase de propagation. L'écart entre les courbes reste constant, ce qui signifie que la célérité de l'onde reste identique d'un point à l'autre. Les faibles variations de vitesse observées sur le dernier profil permettent de valider les conditions d'absorption imposées en face arrière du VES. Par ailleurs, l'utilisation des conditions de symétrie sur les faces latérales assurent une propagation plane de l'onde sans perturbation venant des bords du domaine.

Dans le VES poreux (avec les pores et fissures créés par suppression d'éléments et de liens), les profils de vitesse sont modifiés au cours de la propagation : la microstructure est à l'origine de fluctuations locales de la vitesse. Ces fluctuations, qui peuvent dépasser 100% à certains endroits, ont été gommées par le choix de tracer une vitesse moyenne sur tous les éléments d'une section. Enfin, des perturbations des champs de vitesses dans les directions orthogonales ( $\vec{x}$  et  $\vec{z}$ ) sont aussi observées.

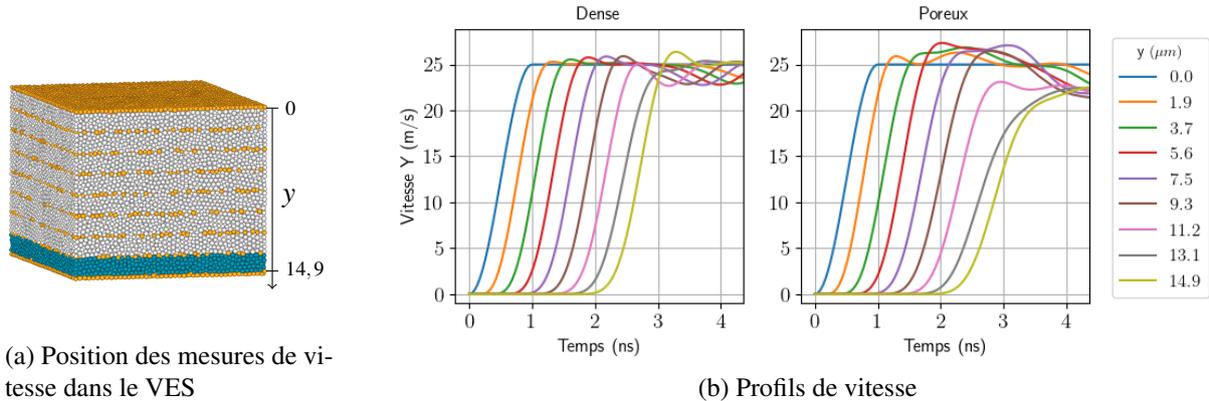


FIGURE 7 – Propagation d'une onde de contrainte dans le VES

Pour illustrer les effets de la présence de micro-défauts sur les mécanismes de fissuration, des simulations numériques sur les VES dense et poreux ont été effectuées en activant un critère de fissuration. Celui-ci est défini au niveau des éléments sur les contraintes principales et il entraîne la suppression des liens concernés lorsque le seuil en traction est atteint. Pour plus de détail le lecteur se référera aux travaux de André [2]. Deux niveaux de contraintes à rupture ont été choisi arbitrairement, à savoir 300 et 400 MPa.

La Figure 8 présente l'évolution du nombre de liens rompus au cours du temps, ce nombre représente la création et l'évolution des endommagements au cours de l'essai. Le domaine dense (courbes en trait pointillé) n'est pas endommagé par le passage de l'onde (le nombre de liens cassés reste nul) alors que dans le domaine poreux l'endommagement augmente progressivement avec la propagation de l'onde. Les défauts (pores et fissures) sont donc bien responsables de l'amorçage d'endommagement dans nos simulations. Ceci s'explique notamment par la génération de concentrations de contraintes, en particulier en traction, au niveau des porosités. Le domaine dense étant quant à lui uniquement sollicité en compression, le critère d'endommagement n'est jamais atteint. Il est aussi intéressant de noter que la cinétique de rupture ne s'arrête pas dès que le domaine est entièrement comprimé : après l'arrivée de l'onde en face arrière vers 4 ns (cf. Figure 7b) le nombre de liens cassés continue d'augmenter.

Enfin, le niveau du seuil a bien entendu un effet sur la rupture : un seuil plus faible conduit à un plus grand nombre de liens cassés.

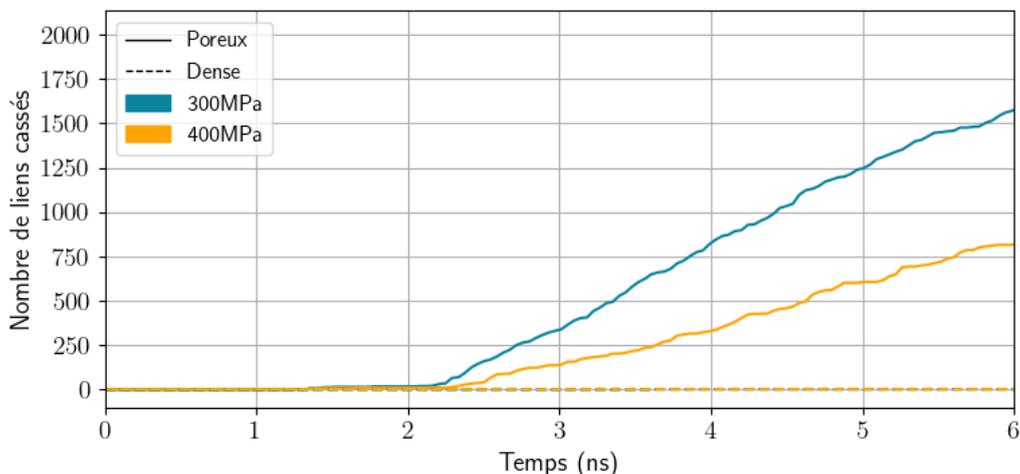


FIGURE 8 – Nombre de liens rompus en fonction du temps dans 2 VES pour 2 seuils de rupture

## 5 Conclusion

Une méthode permettant de construire des modèles numériques 3D reproduisant fidèlement la microstructure de céramiques projetées plasma a été développée. Ceci est rendu possible grâce à la méthode des éléments discrets et son aptitude à représenter les milieux hétérogènes, ainsi qu'au recours à un MEB-FIB pour obtenir des visualisations fines de la microstructure.

Les images obtenues au MEB-FIB sont soumises à plusieurs traitements afin d'extraire précisément les micro-défauts. Ils sont ensuite représentés dans le domaine discret, soit par la suppression d'éléments (macro-porosités), soit par la suppression de liens (micro-fissures). Ce choix de modélisation présente l'avantage de ne pas trop contraindre la taille des éléments par la taille des plus petites porosités à représenter. Il est alors possible de reproduire des domaines 3D sans avoir recours à un trop grand nombre d'éléments.

Il est important de noter que les volumes élémentaires construits sont trop petits pour être représentatifs du revêtement global. L'objectif est de développer un certain nombre de ces VES pour mettre en évidence l'importance de la microstructure sur le comportement de la céramique projetée plasma.

Le modèle développé dans cette étude vise à étudier les effets de la microstructure sur la propagation d'une onde de contrainte. Les premiers résultats sont d'ores et déjà encourageants : les simulations numériques montrent clairement l'influence des défauts sur les mécanismes d'endommagement en compression dynamique. Des développements sont en cours pour améliorer la représentation de ces défauts et la gestion de l'endommagement du milieu.

Enfin, il est envisagé de développer ce type d'approches sur des céramiques projetées plasma de microstructures variées et de valider ces modélisations à partir d'essais expérimentaux d'indentations et de chocs laser.

A terme, l'objectif est de changer d'échelle et cette méthode devrait aider au développement de nouvelles lois de comportement « homogènes équivalentes », prenant en considération les aspects microstructuraux de la céramique dans des représentations macroscopiques.

## Références

- [1] D. André, I. Iordanoff *et al.* *Discret element method to simulate continuous material by using the cohesive beam model*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier, 113-125, 2012.
- [2] D. André, M. Jebahi, I. Iordanoff, J-L. Charles and J. Neauport. *Using the discrete element method to simulate brittle fracture in the indentation of a silica glass with a blunt indenter*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier, 136-147, 2013.
- [3] G. Antou, G. Montavon *et al.* *Characterizations of the pore-crack network architecture of thermal-sprayed coatings*, Materials Characterization, Elsevier, 361-372, 2004.
- [4] J. Bourgade, R. Marmoret *et al.* *Diagnostics hardening for harsh environment in Laser Mégajoule*, Review of Scientific Instruments, AIP Publishing, 2008.
- [5] N. Ferguen, Y. Mebdoua-Lahmar *et al.* *DEM model for simulation of crack propagation in plasma-sprayed alumina coatings*, Surface and Coatings Technology, Elsevier, 287-297, 2019.
- [6] J. Girardot and E. Prulière. *Elastic calibration of a discrete domain using a proper generalized decomposition*, Computational Particle Mechanics, Springer, 993-1000, 2021.
- [7] Z. Jiang, G. Gao *et al.* *Mechanical response and deformation mechanisms of porous PZT95/5 ceramics under shock-wave compression*, Journal of the European Ceramic Society, Elsevier, 1251-1262, 2021.
- [8] A. Kulkarni, Z. Wang *et al.* *Comprehensive microstructural characterization and predictive property modeling of plasma-sprayed zirconia coatings*, Acta Materialia, Elsevier, 2457-2475, 2003.
- [9] K. Radi, H. Saad *et al.* *Effect of microstructure heterogeneity on the damage resistance of nacre-like alumina : Insights from image-based discrete simulations*, Scripta Materialia, Elsevier, 210-214, 2021.
- [10] A. Selçuk and A. Atkinson. *Elastic properties of ceramic oxides used in solid oxide fuel cells (SOFC)*, Journal of the European Ceramic Society, Elsevier, 1523-1532, 1997.
- [11] U. Welling and G. Germano. *Efficiency of linked cell algorithms*, Computer Physics Communications, Elsevier, 611-615, 2011.
- [12] F. Wittel, K. Kovacs and H. Herrmann. *Simulation of dynamic crack propagation in heterogeneous media*, 18th European Conference on Fracture, 2010.
- [13] Y. Yu, X. Cao *et al.* *Delayed fracture of porous ceramics under shock-wave compression*, Engineering Fracture Mechanics, Elsevier, 38-44, 2019.