

**Titre en français :** *Identification des paramètres statistiques des matériaux polycristallins à partir de mesures du champ d'ondes*

**Titre en anglais :** *Identification of the statistical parameters of polycrystalline materials from wave field measurements*

**Contact :** Shahram KHAZAIE

**Tel :** 02 72 64 87 54

**E-Mail :** [shahram.khazaie@univ-nantes.fr](mailto:shahram.khazaie@univ-nantes.fr)

**Type de financement :** financement doctoral sur bourse MENRT

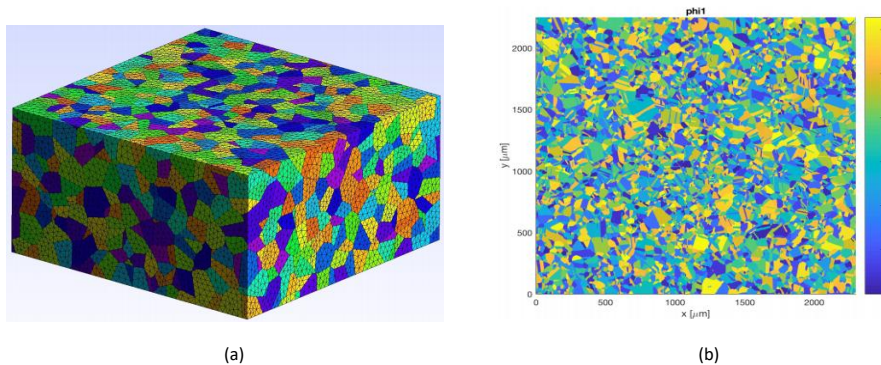


Figure : (a) 3D finite element mesh of a polycrystalline material, (b) Euler angle measurements from EBSD

### Résumé en français :

L'évaluation non-destructive des matériaux polycristallins en utilisant les ondes est un sujet de recherche vaste et récent. Ces matériaux sont composés de grains discrets ayant des formes, des tailles, des orientations cristallographiques différentes (Fig 1a). De plus, des grains adjacents ont des propriétés mécaniques et des densités différentes. Cela implique une microstructure fortement hétérogène et anisotrope qui évolue durant les procédés de fabrication métallurgiques tels que laminage, forgeage ou recuit isotherme. De ce fait, la caractérisation des propriétés mécaniques des polycristaux (et son évolution) à l'échelle des grains est très complexe et est un sujet d'intérêt industriel.

Les approches stochastiques étant capables de décrire les variations spatiales très complexes sont naturellement adaptées pour la représentation probabiliste des orientations cristallographiques [1-2]. L'objectif de la thèse est d'identifier les statistiques des paramètres mécaniques des matériaux polycristallins. Cette identification sera basée d'une part (i) sur une modélisation probabiliste du milieu polycristallin basée sur les angles d'Euler caractérisant les orientations locales des grains, et d'autre part (ii) sur la mesure de champ d'ondes dans le milieu.

Le modèle probabiliste sera donc utilisé pour décrire les réalisations du champ hétérogène des angles d'Euler. Pour alimenter ce modèle probabiliste, les données expérimentales obtenues par un essai de type EBSD seront utilisées (Fig 1, droite). Le tenseur d'élasticité de chaque grain  $C^g(\mathbf{x})$  sera donc égale à une matrice aléatoire de rotation appliquée au tenseur de comportement des monocristaux  $C^{cr}$ . A partir des statistiques des angles d'Euler, nous

pouvons remonter au tenseur de raideur élastique macroscopique. Cette étape donnera des informations sur les statistiques des paramètres mécaniques du milieu.

L'objectif est d'inférer les paramètres statistiques des milieux polycristallins à partir d'opérateurs de diffraction déduits de mesures de l'atténuation du champ d'onde injecté dans le milieu. En effet quand l'onde se propage à travers un milieu polycristallin, son interaction avec les hétérogénéités dans les propriétés mécaniques ainsi que la densité des cristallites crée un champ d'onde diffracté. Aujourd'hui nous savons que le contenu énergétique du champ d'onde multiplément diffracté porte les informations liées aux paramètres statistiques du milieu de propagation. Ces énergies sont théoriquement décrites par les équations de transfert radiatif qui n'ont été que récemment développées pour le cas général des matériaux hétérogènes anisotropes continus [4]. Afin d'étendre ces résultats au cas des matériaux polycristallins, au lieu de résoudre ces équations de transfert, nous simulerons la propagation des ondes dans les milieux polycristallins aléatoirement hétérogènes pour estimer les valeurs de ces énergies. De plus, les asymptotes des paramètres de diffraction (section efficace de diffraction) pour différents régimes seront analytiquement développées en fonction des statistiques du milieu [4].

#### **Mots clés :**

Matériaux polycristallins, Modélisation probabiliste, Identification, Propagation d'onde, Atténuation.

#### **Profil du candidat recherché :**

Le candidat recherché a une formation en mécanique numérique ou théorique. Une formation en mécanique stochastique serait un plus.

#### **Abstract in English :**

The non-destructive investigation of polycrystalline materials using waves is a vast and recent research topic. These materials are composed of discrete grains with different shapes, sizes and crystallographic orientations (Fig 1a). Furthermore, adjacent grains present different mechanical properties and densities. This comes from a strongly heterogeneous and anisotropic microstructure that evolves during metallurgical manufacturing processes such as rolling, forging or isothermal annealing. As a result, the characterization of the mechanical properties of polycrystals (and their evolutions) at the grain scale is very complex and is a subject of industrial interest.

Stochastic approaches being capable of describing very complex spatial variations are naturally suited for the probabilistic representation of crystallographic orientations [1-2]. The objective of the thesis is to identify the statistics of the mechanical parameters of polycrystalline materials. This identification will be based on (i) a probabilistic modeling of the polycrystalline medium on the basis of the Euler angles characterizing local grain orientations, and (ii) measurements of the scattered wave field in the medium.

The probabilistic model will therefore be used to describe the realizations of the heterogeneous field of the Euler angles. In order to feed this probabilistic model, the experimental data obtained by an EBSD test will be used (Fig 1b). The elasticity tensor of each grain  $C^g(\mathbf{x})$  will thus be equal to a random rotation matrix applied to the stiffness tensor of the single crystals  $C^{cr}$ . From the statistics of the Euler angles, one can determine the macroscopic elastic stiffness matrix. This step will provide information about the statistics of the mechanical parameters of the medium.

The objective is to infer the statistical parameters of polycrystalline materials from the scattering operators derived from measurements of the wave field attenuation. Indeed, when the wave propagates through a polycrystalline medium, its interaction with the heterogeneities in mechanical properties as well as density of the crystallites creates a scattered wave field. As of today, we know that the energy content of the multiply scattered wave field carries information related to the statistical parameters of the propagation medium. These energies are theoretically described by the radiative transfer equations that have recently been developed for the general case of continuous anisotropic heterogeneous materials [4]. In order to extend these results to polycrystalline materials, instead of solving the radiative transfer equations, we will simulate wave propagation in randomly heterogeneous polycrystalline media to estimate the energy values. In addition, asymptotic expressions of the scattering parameters (scattering cross-sections) for different propagation regimes will be analytically developed in terms of the statistics of the medium [4].

#### **Keywords :**

Polycrystalline materials, Probabilistic modelling, Identification, Wave propagation, Attenuation.

**Candidate profile :**

The candidate should have a background in numerical or theoretical mechanics. Knowledge about stochastic mechanics would be a plus.

**References :**

- [1] A. Noshadravan, R. Ghanem, J. Guillemot, I. Atodaria, P. Peralta (2013), *Validation of a probabilistic model for mesoscale elasticity tensor of random polycrystals*, International Journal for Uncertainty Quantification
- [2] J. Guillemot, A. Noshadravan, C. Soize, R. Ghanem (2011), *A probabilistic model for bounded elasticity tensor random fields with application to polycrystalline microstructures*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering
- [3] I. Baydoun, E. Savin, R. Cottureau, D. Clouteau and J. Guillemot (2014), *Kintetic modeling of multiple scattering of elastic waves in heterogeneous anisotropic media*, Wave Motion.
- [4] S. Khazaie, R. Cottureau and D. Clouteau (2016), *Influence of the statistical parameters of a random heterogeneous medium on elastic wave scattering: theoretical and numerical approaches*, Journal of Sound & Vibration.

**Duration: 36 months**

**Location :** IUT de Saint-Nazaire, 58 rue Michel Ange, 44600, Saint-Nazaire.

**Host Laboratory:** Laboratoire GeM (<https://gem.ec-nantes.fr/>), E3M (<https://gem.ec-nantes.fr/e3m/>) and TRUST (<https://gem.ec-nantes.fr/trust/>) research teams.

**Supervisors:** Sylvain FREOUR, Shahram KHAZAIE, Mathilde CHEVREUIL PLESSIS

{sylvain.freour,shahram.khazaie,mathilde.chevreuil}@univ-nantes.fr

**To apply:** Send a CV, Master grades, Recommendation letters, and a Motivation letter to: Shahram KHAZAIE [shahram.khazaie@univ-nantes.fr](mailto:shahram.khazaie@univ-nantes.fr) before **01/05/2019**.