

# Proposition de projet de Mastère spécialisé

## Design des Matériaux et des Structures

### Année 2019-2020

**Société partenaire** : Safran

**Lieu de réalisation de l'étude** Centre des Matériaux et Safran Tech

#### Encadrement

---

Basile Marchand (Mines ParisTech)

Augustin Parret-Fréaud (Safran Tech)

#### Titre

---

Stratégies d'adaptation de maillage en milieu hétérogène

#### Contexte

---

Les bureaux d'études ont de plus en plus recours aux simulations numériques lors des processus de dimensionnement des pièces aéronautiques. Si les progrès effectués en la matière permettent de simuler des systèmes physiques de plus en plus complexes, il est nécessaire de pouvoir évaluer le degré de fiabilité des simulations, et d'améliorer la précision des résultats tout en gardant un coût de calcul raisonnable. Il apparaît alors le besoin de contrôle de la qualité d'une simulation numérique au regard des différentes sources d'erreur : discrétisation spatiale (finesse de maillage) et temporelle (algorithmes d'évolution), erreurs de modèle physique et mécanique, etc.

La méthode des éléments finis (EF) est la plus répandue pour le calcul des structures industrielles. Dans ce cadre, on s'intéressera à l'erreur de discrétisation spatiale, qui est définie comme l'écart entre la solution exacte et la solution obtenue par résolution EF du problème discret. En pratique, la solution exacte est rarement connue et la manière dont elle est approchée permet de distinguer les techniques d'estimation de l'erreur à posteriori. Une fois l'obtention d'une cartographie de l'erreur commise, ces techniques permettent par la suite la localisation des zones critiques et la détermination de consignes en vue d'une procédure d'adaptation de maillage automatique, le tout afin d'optimiser les ressources des simulations et atteindre une solution à une précision demandée.

L'estimateur d'erreur par lissage ou de type Zienkiewicz et Zhu (ZZ2) [1] est parmi les plus populaires dans l'industrie. Son fonctionnement repose sur un post traitement du champ de contrainte à caractère non intrusif, ce qui a facilité son implantation dans plusieurs codes métiers (Abaqus, Z-set, etc.). Initialement développé dans le cadre de problèmes linéaires, il a également été étendu à certains types de non-linéarités.

Néanmoins, le développement croissant de matériaux à microstructures complexes (composites tissés, alliages polycristallin, etc.) fait apparaître des structures présentant des hétérogénéités entre matériaux qui, dans le cas d'alliages polycristallins, sont localisées au niveau des joints de grains où une estimation précise des champs paraît cruciale afin d'évaluer les mécanismes d'endommagement. Après avoir observé un manque de robustesse par rapport à ce type de problèmes, une extension simple de l'estimateur de type ZZ2 a été proposée dans de précédents travaux [2] afin d'en retrouver la robustesse.

En plus d'une mesure de l'erreur globale, ce type d'estimateur permet d'accéder à l'ensemble des contributions élémentaires à cette erreur. Dans le cadre d'une stratégie de contrôle automatique de la discrétisation spatiale selon un objectif de précision donné, l'étape suivante consiste à adapter le maillage suivant les informations données par l'estimateur.

## Objectif et travail proposé

---

L'objectif de ce stage est de mettre en place et d'étudier la pertinence de plusieurs méthodes d'adaptation de maillage à partir des informations données par l'estimateur d'erreur ZZ2 amélioré. Plusieurs méthodes sont envisageables à ce stade [3-5] :

- utilisation d'une stratégie de remaillage global sur la zone concernée ;
- utilisation de stratégies locales de type h ou p-raffinement éléments par éléments.

Dans les deux cas précédents, la construction d'une consigne de taille de maille adaptée est un élément crucial. Cette consigne doit permettre d'atteindre la précision cible tout en minimisant le nombre d'inconnues à résoudre.

Les différentes étapes de ce stage seront :

- une étude bibliographique des différentes méthodes d'adaptation de maillage existantes (h-raffinement, p-raffinement...) ainsi que des critères permettant la construction de consignes de remaillage ;
- l'implémentation de plusieurs métriques de remaillage, leur application conjointe avec une bibliothèque de remaillage sur des cas tests et cas métiers représentatifs (composites tissés, aube de turbine polycristalline) afin d'en identifier les avantages et limites ;
- implémentation et application d'une stratégie de type p-raffinement local éléments par éléments en lien avec l'estimateur d'erreur et sa comparaison avec l'approche précédente par remaillage global ;
- comparaison de l'efficacité des différentes approches mentionnées en fonction de plusieurs critères (taille du problème résultant, taux de convergence, taux d'hétérogénéité, approximation locale des champs...).

Les travaux seront réalisés au sein de la suite logicielle EF Z-set, qui est dotée de la version améliorée de l'estimateur d'erreur ZZ2 pour les problèmes hétérogènes ainsi que d'une interface vers plusieurs bibliothèques de (re)maillage telles MMG3D. Les problèmes étudiés seront, dans un premier temps, de comportement linéaire élastique, puis non linéaire en présence de plasticité.

## Profil demandé

---

Le sujet convient à un candidat ayant un profil mécanique des matériaux et des structures ou mathématiques appliquées, et qui souhaite mettre en œuvre ces connaissances dans des calculs de structures, analyse numérique et programmation (C/C++).

## Références

---

[1] O. C. Zienkiewicz et J. Z. Zhu, «The superconvergent patch recovery and a posteriori error estimates. Part 1: the recovery technique,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 33, pp. 1331-1364, 1992.

[2] A. El Ouazani Tuhani, « Stratégie d'estimation d'erreur a posteriori et d'adaptation en

milieu hétérogène», *Rapport de stage, Master spécialisé DMS*, 2018.

- [3] I. Babuska, B. Szabo. On the rates of convergence of the Finite Element method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 18(3) :323-341, 1982.
- [4] L. Demkowicz, Ph. Devloo, J.T. Oden. On an h-type mesh-refinement strategy based on minimization of interpolation errors, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 53(1) :67-89, 1985.
- [5] P. Ladeveze, J.-P. Pelle, *Mastering calculations in linear and non linear mechanics*, Springer Verlag, New York, 2000