

Méthodes numériques pour la simulation des procédés

**AM Habraken^a, T.Q.D .Pham^{a,b}, B.J. Bobach^c, T. V. Hoang^d, X. V. Tran^e,
A. Mertens^f, J.P. Ponthot^g, L. Duchêne^h**

a. Université de Liège, dpt ArGEnCo, équipe MSM anne.habraken@uliege.be

b. Thu Dau Mot University, Institute of Strategy Development, pqducthinhbka@gmail.com

c. Université de Liège, dpt A&M, équipe LTAS-MN2L, billy-joe.bobach@uliege.be

d. RWTH-Aachen University, Chair of Math. for Uncertainty Quantification, hoang.tr.vinh@gmail.com

e. Thu Dau Mot University, Institute of Strategy Development, xuantv@tdmu.edu.vn

f. Université de Liège, dpt A&M, équipe MMS, Anne.Mertens@uliege.be

g. Université de Liège, dpt A&M, équipe LTAS-MN2L, jp.ponthot@uliege.be

h. Université de Liège, dpt ArGEnCo, équipe MSM, l.duchene@ulg.ac.be

Mots clés : Finite Element Method; Solid Shell; Multiscale Models, Deep Learning

Résumé

Une revue des choix à poser face à la simulation des procédés d'élaboration et de fabrication est présentée. Le modélisateur doit déterminer l'échelle pertinente par rapport à son intérêt, les logiciels et les données disponibles et les phénomènes activés lors des procédés. Les approches telles que Molecular Dynamic (MD), Discrete Dislocation Dynamics (DDD), Quasi Continuum (QC), Phase Field (PF), Crystal Plasticity (CP) seront très brièvement présentées. Une attention plus particulière sera dédiée à la méthode des éléments finis (FEM) appliquée dans un premier temps à l'emboutissage de tôles métalliques. Dans ce cadre, les principes des éléments solid-shell seront rappelés. L'importance des lois constitutives « méso » à l'échelle des dislocations, des cristaux et des lois dites phénoménologiques à l'échelle macroscopique, de leur identification sera démontrée pour un matériau poly cristallin ou comportant peu de cristaux (effet d'échelle). Afin d'aborder les simulations impliquant des phénomènes multi-physiques, des modèles éléments finis dédiés aux événements présents lors du refroidissement de pièces seront brièvement rappelés avant d'étendre le survol des outils de modélisations au cas de l'impression 3D métal avec le couplage entre FEM et Deep Learning (DL) et les perspectives de la méthode Particle Finite Element (PFEM).

1. Introduction

Le lien entre les propriétés mécaniques (raideur, ténacité, ductilité, durée de vie en fatigue...) et la microstructure d'un composant n'est plus à démontrer mais bien à comprendre, quantifier. Aujourd'hui, la science des matériaux vise à optimiser les paramètres du procédé pour atteindre des pièces de qualité et réduire leur coût tant financier qu'environnemental. La méthodologie mise en œuvre s'appuie largement sur des simulations. L'industrie attend des simulations quantitatives qui permettent réellement de lancer des processus d'optimisation mathématiques du procédé (élaboration et post traitement) pour minimiser l'énergie exploitée, accroître la qualité des pièces fournies, quantifier leur probabilité de fracture, leur durée de vie.

La simulation des procédés d'Elaboration et de Fabrication requière de nombreux choix. Les critères de sélection du software exploité dépendent des objectifs poursuivis mais aussi du procédé et surtout des données accessibles quant au matériau et aux conditions de fabrication (température, vitesse de déformation, effort imposé, usure des outils, friction...).

2. Contenu du cours

En premier lieu, ce cours parcourra très brièvement les méthodes disponibles MD, DDD, QC, PF, CP : principes de base, résultats possibles, intérêts, inconvénients et surtout références à des auteurs vous permettant d'approfondir. Puis, la méthode des éléments finis étant très largement utilisée, le cours s'y attardera pour rappeler l'organigramme classique d'un code éléments finis non linéaires et les principes qui régissent la programmation des éléments « solid-shell ».

Le benchmark ESAFORM 2021 sera exploité pour analyser les forces et faiblesses de nombreuses lois constitutives à l'échelle macroscopique ou mésoscopique. La plasticité cristalline utilisée directement pour la simulation d'un emboutissage ou pour calibrer une surface de plasticité via l'usage d'un Representative Volume Element RVE et de la méthode Fast Fourier Transform(FFT) sera présentée. La plasticité à gradient permettant d'aborder les effets d'échelle sera introduite.

Après ces simulations « simples » de la déformation mécanique à température ambiante, le cas des modèles couplés thermomécaniques sera introduit sur les cas concrets de cylindres de laminoirs et de la coulée continue.

L'étape suivante de ce voyage à travers les outils de simulations insistera sur l'usage des RVEs pour modéliser le comportement d'une microstructure. Il sera illustré pour un matériau bi-phasé (AlSi10Mg généré par Laser Bed Fusion et post traité par du Friction Stir Processing). C'est un ingrédient essentiel pour poursuivre avec la méthode des éléments finis au carré FE² (approche multi-échelle par excellence).

La tendance actuelle de relier éléments finis et intelligence artificielle clôturera ce parcours avec une démonstration sur le cas de simulations du procédé Directed Energy Deposition.

Si ce marathon ne nous a pas épuisé nous échangerons sur les recherches en cours sur la méthode Particle Finite Element (PFEM).

Vu l'ampleur de la matière, ce cours cherche surtout à vous ouvrir l'esprit sur tous les outils disponibles. Des liens vers des vidéos et de nombreuses références à des livres, des articles, des thèses seront fournis pour vous permettre d'approfondir la thématique importante pour vous.