

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech
(mémoire provisoire)
T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Spécialité " Mécanique - matériaux "

présentée et soutenue publiquement par

Holanyo Koffi AKPAMA

**Approche multi-échelles pour une prédiction fiable
de la ductilité des matériaux métalliques**

Directeur de thèse : **Farid ABED-MERAIM**

Co-encadrement de la thèse : **Mohamed BEN BETTAIEB**

Jury

M. Laurent DELANNAY , Professeur, IMMC, Université Catholique de Louvain	Rapporteur
M. Philippe PILVIN , Professeur, IRDL, Université de Bretagne-Sud	Rapporteur
Mme. Anne-Marie HABRAKEN , Directrice de Recherches FNRS, MS ² F, Université de Liège	Examineur
M. Yao KOUTSAWA , Docteur (HDR), MRT, Luxembourg Institute of Science and Technology	Examineur
M. Farid ABED-MERAIM , Professeur, LEM3, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. Mohamed BEN BETTAIEB , Maître de Conférences, LEM3, Arts et Métiers ParisTech	Examineur

APPROCHE MULTI-ÉCHELLES POUR UNE PRÉDICTION FIABLE DE LA DUCTILITÉ DES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

RÉSUMÉ : Cette thèse a pour objectif principal de développer un outil numérique capable de prédire la ductilité des matériaux polycristallins. Cet outil est basé sur le couplage de l'approche multi-échelles autocohérente à deux critères d'instabilités plastiques : la théorie de bifurcation et l'approche d'imperfection initiale. Le schéma autocohérent est utilisé pour déterminer le comportement d'un agrégat polycristallin (supposé représentatif du matériau étudié) à partir du comportement des monocristaux constitutifs. Le comportement à l'échelle monocristalline est formulé dans le cadre des grandes déformations élastoplastiques. Deux différentes versions du critère de Schmid sont successivement utilisées pour modéliser l'écoulement plastique monocristallin : la version classique et une version régularisée. Pour intégrer numériquement les équations constitutives à l'échelle monocristalline, deux algorithmes ont été développés : un algorithme de type évolutif et un algorithme de type retour radial. Les équations gouvernant le schéma autocohérent ont été revisitées. Pour résoudre ces équations, un nouvel algorithme numérique a été proposé, qui est montré être plus efficace que les algorithmes existants communément basés sur la méthode du point fixe. De plus, une approche numérique robuste a été développée, qui permet de coupler le modèle autocohérent à l'approche d'imperfection initiale. La performance ainsi que la robustesse des différents algorithmes et schémas numériques développés ont été mis en évidence à travers plusieurs résultats de simulation. L'effet de plusieurs paramètres et choix de modélisation sur la prédiction de formabilité des tôles métalliques a été extensivement analysé.

Mots clés : approche multi-échelles, plasticité cristalline, ductilité, instabilité plastique, théorie de bifurcation, approche d'imperfection initiale, courbe limite de formage.

A MULTISCALE APPROACH FOR A RELIABLE PREDICTION OF THE DUCTILITY OF METALLIC MATERIALS

ABSTRACT: The main objective of this PhD thesis is to develop a numerical tool capable of predicting the ductility of polycrystalline materials. This tool is based on the coupling of the self-consistent multiscale approach with two plastic instability criteria: the bifurcation theory and the initial imperfection approach. The self-consistent scheme is used to derive the mechanical behavior of a polycrystalline aggregate (assumed to be representative of the studied material) from that of its microscopic constituents (the single crystals). The constitutive framework at the single crystal scale follows a finite strain rate-independent formulation. Two different versions of the Schmid law are successively used to model the plastic flow: the classical version and a regularized one. To solve the constitutive equations at the single crystal scale, two numerical algorithms have been developed: one is based on the usual return-mapping scheme and the other on the so-called ultimate scheme. The equations governing the self-consistent approach have been revisited. To solve these equations, a new numerical scheme has been developed, which is shown to be more efficient than the existing schemes commonly based on the fixed point method. Also, a robust numerical approach has been developed to couple the self-consistent model to the initial imperfection approach. The performance and the robustness of the different numerical schemes and algorithms developed have been highlighted through several simulation results. The impact of various parameters and modeling choices on the formability prediction of sheet metals has been extensively analyzed.

Keywords: multiscale approach, crystal plasticity, ductility, plastic instability, bifurcation theory, initial imperfection approach, forming limit diagram.