

Étude in-situ des premiers stades de l'endommagement ductile (nucléation de cavités) dans les alliages Cu-Al

1. Contexte et état de l'art

La rupture ductile des matériaux métalliques résulte d'un endommagement par cavitation assisté par la plasticité, généralement décrit en trois étapes : nucléation, croissance et coalescence des cavités [1]. Si les mécanismes de croissance et de coalescence sont aujourd'hui bien établis et modélisés, ceux associés à la nucléation restent encore insuffisamment compris et difficilement quantifiables de façon prédictive, notamment aux échelles microscopiques et atomiques. Dans ce cadre, la nucléation des cavités est généralement attribuée à l'accumulation progressive de défauts cristallins induits par la déformation plastique, en particulier via l'activité des dislocations et la formation de lacunes, qui constituent les premiers états d'endommagement localisé susceptibles de conduire à une perte de cohésion.

Ces mécanismes microscopiques de localisation des défauts soulèvent néanmoins, aux fines échelles, plusieurs questions fondamentales qui demeurent ouvertes. La décohésion interfaciale est généralement considérée comme résultant de deux étapes successives. La première correspond à l'apparition d'une fissure naissante ou d'une cavité initiale. La seconde est associée à la propagation de la fissure le long de l'interface. Les mécanismes responsables de la première étape restent toutefois mal compris. Des observations in situ en microscopie électronique en transmission (TEM) suggèrent soit qu'une interface matrice/précipité peut subir une décohésion partielle [2], soit que les parois de cellules de dislocations accommodantes situées à proximité des interfaces matrice/précipité constituent les sites d'amorçage de la rupture ductile, plutôt que l'interface elle-même [3].

La seconde étape soulève la question du niveau de contrainte élevé nécessaire à la propagation de la fissure, qui semble difficilement atteignable dans une microstructure normalement ductile soumise à une déformation plastique. D'autres mécanismes, reposant sur la croissance d'une cavité embryonnaire préexistante, ont également été proposés. Ceux-ci font intervenir soit l'adsorption de lacunes, soit une croissance médiée par l'émission de boucles prismatiques de dislocations [4]. Les modèles micromécaniques existants reposent sur des hypothèses différentes selon les approches, ce qui conduit à des estimations parfois très dispersées des contraintes critiques.

Cette incertitude sur les mécanismes élémentaires de l'endommagement souligne la nécessité de disposer de systèmes modèles permettant d'isoler et de confronter les différentes hypothèses proposées. Dans ce contexte, les alliages Cu-Al constituent des systèmes particulièrement pertinents pour étudier la nucléation des cavités. Selon la composition, ils permettent d'accéder à des microstructures contrastées : des états biphasés contenant une matrice et des précipités intermétalliques, propices à l'étude de la décohésion interfaciale, ainsi que des solutions solides concentrées susceptibles de présenter, sous déformation, des réarrangements atomiques ou des transformations structurales associées aux règles de stabilité électronique de type Hume-Rothery, encore débattues dans la littérature. Ces différentes microstructures permettent ainsi d'analyser l'influence de la chimie et de la microstructure sur les premiers stades de l'endommagement ductile.

2. Objectifs et démarche

Dans cette perspective, deux approches expérimentales complémentaires et multi-échelles seront mises en œuvre.

Des essais de traction *in-situ* en microscopie électronique en transmission à haute résolution (HR-TEM) seront réalisés afin d'observer directement les mécanismes locaux de déformation et les premières étapes de la rupture sur des alliages modèles. La cartographie des champs de déformation associés sera analysée afin d'identifier les défauts cristallins impliqués ainsi que les éventuelles évolutions ou transformations de phases (Figure 1a). Ces observations permettront d'envisager un couplage avec la simulation à l'échelle atomique (type EAM).

En parallèle, des essais de traction interrompus seront couplés à des caractérisations tridimensionnelles par tomographie Plasma-FIB (Figure 1b). Cette approche permettra de quantifier l'évolution de l'endommagement dans le volume, notamment la formation et la distribution des cavités. La reconstruction 3D sera complétée par des analyses EBSD 3D afin de relier l'endommagement à la microstructure initiale et déformée.

Le couplage de ces approches multi-échelles permettra de relier les mécanismes locaux de nucléation, l'évolution microstructurale et la réponse macroscopique en endommagement. L'étude permettra de mieux comprendre les premiers stades de la rupture ductile dans les alliages métalliques, afin d'alimenter des modèles prédictifs plus robustes et, à terme, de contribuer à la conception d'alliages plus résistants à l'endommagement.

Mots clés : Plasticité, rupture ductile, approche multi-échelle, essais mécaniques *in-situ*, tomographie 3D, TEM.

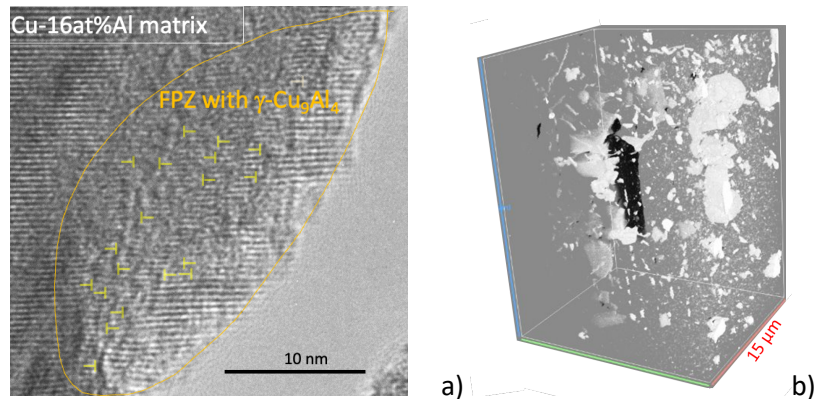


Figure 1 : **a)** Zone de processus de fracture (FPZ) dans un alliage Cu16at%Al observée par HRTEM *in situ* avec orientation (111) en bord à bord, montrant la formation de nanograins à la surface de la fracture. On peut noter l'interface fortement disloquée. **b)** caractérisation 3D par tomographie Plasma-FIB d'un alliage Al-4wt% Cu déformé ; les zones sombres correspondent aux cavités d'endommagement ductile.

Profil recherché

Le ou la candidat(e) recherché(e) aura une formation en métallurgie mécanique, mécanique des matériaux, ou physique du solide. Un goût prononcé pour le travail expérimental est essentiel pour mener à bien ce projet. Des compétences en simulation atomistique seraient également appréciées, afin de favoriser les échanges avec le volet théorique développé dans le cadre du projet ANR associé.

Laboratoire d'accueil

La thèse sera réalisée au laboratoire PIMM (Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux, ENSAM/CNRS/CNAM) à Paris, avec des déplacements sur le plateau de Paris-Saclay pour les campagnes expérimentales.

Financement : Projet ANR DUTIFREE, démarré en janvier 2026.

Contacts : Thierry Auger, Bassem Barkia, Zehoua Hamouche

(Mel : thierry.auger@ensam.eu, bassem.barkia@ensam.eu, zehoua.hamouche@ensam.eu)

Laboratoire PIMM/Arts et métiers-CNRS-CNAM, UMR CNRS 8006

Références

- [1] Noell et al. "Void nucleation during ductile rupture of metals: A review" Prog. Mater. Sci. 135 (2023) 101085.
- [2] Gao et al., "Void nucleation in alloys with lamella particles under biaxial loadings", Extreme Mechanics Letters 22 (2018) 42-50.
- [3] Cuitino et al., "Ductile fracture by vacancy condensation in F.C.C. single crystals" Acta mater. 44 (1996) 427-436.
- [4] Zhao et al., "Micromechanics of Void Nucleation and Early Growth at Incoherent Precipitates: Lattice-Trapped and Dislocation-Mediated Delamination Modes" Crystals 11 (2021) 45.