

## Sujet de thèse : Etude numérique et expérimentale des liens précipitation/propriétés mécaniques des alliages à durcissement structural

Encadrants : Pierre-Antoine Geslin<sup>(1)</sup>, Michel Perez<sup>(1)</sup>, Thomas Elguedj<sup>(2)</sup>, Thibaut Chaise<sup>(2)</sup>  
 (1) MATEIS, INSA-Lyon, Equipe Métal, 23 Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne.  
 (2) LaMCoS, INSA-Lyon, Equipe MIMESIS, 27b Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne.

Mots-clés : métallurgie physique, précipitation, plasticité, synergie numérique/expérimental

Durée : 3 ans (10/2021 - 10/2024).

Financement : Bourse ministère (sur concours)

Lieu : Laboratoires MATEIS et LaMCoS, INSA-Lyon, 69621 Villeurbanne.

Contact : Pierre-Antoine Geslin (pierre-antoine.geslin@insa-lyon.fr)

Le développement de moyens de transport plus respectueux de l'environnement est un enjeu majeur de nos sociétés modernes. Ce changement se fera par des biais technologiques (voiture électrique, pile à combustible), politiques et sociétaux mais repose également sur le développement matériaux plus performants. Le développement d'alliages métalliques plus légers et résistants ainsi que l'emploi de nouveaux procédés d'élaboration tels la fabrication additive permettra un allègement des véhicules (voitures, trains, avions) et donc une réduction de leur empreinte carbone via l'économie de matière première et de carburant.

La précipitation d'une phase secondaire permet d'augmenter considérablement la limite d'élasticité des alliages d'aluminium et de nickel qui sont largement utilisés dans les transports (e.g. précipités de  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  dans un alliage d'Inconel 718 représentés sur la Fig. 1.a). Il est donc primordial de prédire quantitativement l'état de précipitation et son influence sur la limite élastique d'un alliage en fonction de son histoire thermique qui peut être complexe dans le cas de procédés l'élaboration tels que le soudage ou la fabrication additive. Ainsi, le développement d'outils numériques quantitatifs permettant de prédire (i) l'état de précipitation (ii) la limite élastique d'un alliage est au cœur des problématiques de la métallurgie appliquée et des thématiques des laboratoires MATEIS et LaMCoS [1, 2, 3].

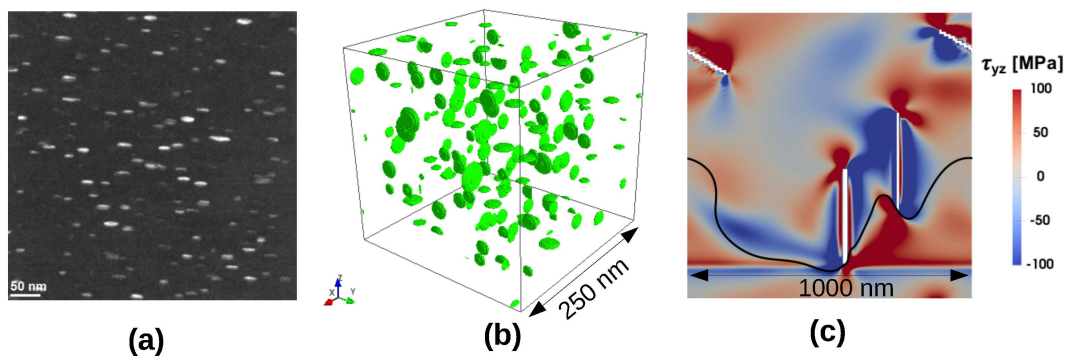


FIGURE 1 – (a) Observation MET de précipités  $\gamma''$  dans l'Inconel 718 [3]. (b) Modèle en champ complet permettant de prédire l'évolution microstructurale d'un alliage. (c) Modèle de dynamique des dislocations permettant de modéliser les interactions entre précipités (en blanc) et dislocations (en noir) ici pour un alliage Al-Cu [4].

Dans ce projet de thèse, nous proposons de développer des approches numériques afin de mieux prédire la microstructure et la limite élastique d'un alliage à durcissement structural en fonction de son histoire thermique. Des mesures expérimentales seront effectuées en parallèle des travaux théoriques

pour calibrer et valider les approches numériques. On se concentrera sur des alliages Al-Sc et Inconel 718 déjà étudiés aux laboratoires MATEIS et LaMCoS.

Dans un premier temps, le·la candidat·e poursuivra le développement d'une nouvelle approche numérique en champ complet permettant de modéliser l'évolution microstructurale d'alliages Al-Sc et Inconel 718 (voir Fig. 1.b) en y incorporant la nucléation de nouveaux précipités. En parallèle, il·elle effectuera des observations expérimentales sur des échantillons ayant subi des traitements thermiques simples afin de valider et d'améliorer les prédictions du modèle numérique. Un avantage de l'approche numérique en champ complet réside dans sa capacité à générer des microstructures réalistes obtenues après le mûrissement des précipités.

La deuxième partie de ce projet de thèse consistera à utiliser ces microstructures réalistes afin de modéliser les interactions entre dislocations et précipités (voir par exemple la Fig.1.b issue d'un article récent [4]) et d'en déduire la limite élastique de l'alliage pour une microstructure donnée. Ces estimations numériques seront également comparées à essais mécaniques effectués sur des éprouvettes d'Al-Sc et d'Inconel 718.

Enfin, notre approche numérique sera mise à l'épreuve en comparant ses résultats à des tests de micro-dureté effectués sur des échantillons ayant subi des traitement thermiques complexes et hétérogènes tels qu'obtenus en fabrication additive.

Cette synergie entre observations expérimentales et simulations numériques permettra (i) de valider les approches numériques développées au sein du laboratoire, (ii) de prédire de façon robuste la limite élastique d'alliages en fonction de leur traitement thermique et (iii) de proposer des lignes directrices permettant d'optimiser les techniques d'élaboration incorporant des traitements thermiques complexes (soudage, fabrication additive, etc.).

Pour réaliser cette thèse, nous recherchons un·e étudiant·e avec le profil suivant :

- Ecole d'ingénieur et/ou Master 2 Recherche spécialité Sciences des Matériaux / Mécanique.
- De bonnes connaissances en sciences des matériaux et en métallurgie seront un plus pour le projet.
- Un certain intérêt pour l'utilisation et le développement d'outils numériques est préférable.
- Les qualités recherchées sont l'autonomie, une curiosité scientifique aiguisée et une certaine rigueur.

## Références

- [1] Didier Bardel, thèse de doctorat INSA-Lyon. *Rôle de la microstructure d'un alliage à durcissement structural sur son comportement et sa tenue mécanique sous sollicitations cycliques après un transitoire thermique*, 2014
- [2] Jérôme Blaizot, thèse de doctorat INSA-Lyon. *Etude de l'influence des procédés de fabrication sur les propriétés mécaniques des alliages de Nickel*, 2015
- [3] Alexandre Balan, thèse de doctorat INSA-Lyon. *Modélisation isotherme et anisotherme de la limite d'élasticité précipitation-dépendante de l'Inconel 718*, 2017.
- [4] R. Santos-Güemes et al. *Multiscale modelling of precipitation hardening in Al-Cu alloys : Dislocation dynamics simulations and experimental validation*. Acta Materialia 188, pp. 475-485, 2020.