

## Proposition de thèse CIFRE :

# "Effets des longueurs internes microstructurales sur le comportement mécanique d'aciers de 3<sup>ème</sup> génération : caractérisations expérimentales et modélisations micromécaniques"

### Contexte industriel et scientifique

Le challenge de la réduction des émissions de gaz à effets de serre constitue aujourd'hui la principale force motrice de développement des aciers pour l'automobile. Afin d'atteindre les limites gouvernementales d'émissions fixées pour 2020-2025, l'industrie automobile doit considérablement réduire le poids des véhicules tout en maintenant un haut niveau de sécurité passive (anti-intrusion et absorption) pour les passagers. En réponse à ces exigences de plus en plus sévères du secteur automobile, l'industrie de l'acier développe de nouveaux aciers à très haute résistance de 3<sup>ème</sup> génération dits à haute formabilité. En substituant les aciers conventionnels par des aciers de 3<sup>ème</sup> génération de plus haute résistance mais tout aussi formables, l'industrie peut répondre à la nécessité d'alléger les véhicules pour réduire les émissions en proposant de pièces automobiles plus fines et donc plus légères.

Les aciers de 3<sup>ème</sup> génération s'inscrivent dans une logique de développement visant à conserver les avantages et à supprimer les inconvénients des deux précédentes générations : la haute résistance (mais formabilité limitée) des aciers martensitiques de 1<sup>ère</sup> génération et la haute formabilité (mais coût trop élevé) des aciers TWIP de 2<sup>ème</sup> génération. ArcelorMittal, leader de la production d'acier pour l'automobile, développe activement cette nouvelle solution d'aciers qui propose un compromis entre haute formabilité, haute résistance et coût compétitif.

Cependant, l'optimisation de ces nouveaux aciers reste très complexe et ouvre un large champ d'investigation et de voies possibles à explorer tant les mécanismes qui entrent en jeu sont nombreux. En particulier, la maîtrise du « multiphasage », c'est-à-dire la combinaison de phases différentes au sein de la microstructure de l'acier, n'est pas encore maîtrisée sur cette famille d'aciers. Ainsi, il est primordial de bien capter le comportement local de chacune des phases ainsi que leurs interactions mécaniques afin d'espérer décrire correctement le comportement global de l'acier. L'identification du comportement local doit se reposer non seulement sur les paramètres microstructuraux observables mais également sur une identification des champs mécaniques locaux ce qui est peu connu dans la littérature. La prise en compte des longueurs internes microstructurales au travers d'un modèle

micromécanique intégrant la plasticité à gradient pourrait s'avérer être un outil novateur très efficace pour le sidérurgiste lui permettant alors d'optimiser la microstructure à l'échelle locale de ses micro-constituants en vue d'obtenir le comportement macroscopique optimal de l'acier.

## Objectifs

Le compromis entre résistance mécanique et formabilité, qui résume aujourd'hui le challenge proposé aux aciers de 3<sup>ème</sup> génération, s'obtient par la réalisation d'une microstructure multiphasée, c'est-à-dire en combinant la présence de plusieurs phases, chacune contribuant, de par ses propriétés intrinsèques, au comportement global. L'une de ces phases, l'austénite résiduelle, est une phase métastable permettant d'accroître la formabilité de l'acier en se transformant sous l'effet de la déformation. La stabilité de cette phase va dépendre de plusieurs paramètres (taille, chimie) mais aussi de son environnement proche (interaction avec les autres phases). L'optimisation de la microstructure des aciers 3<sup>ème</sup> génération n'est pas triviale et requiert un effort de recherche important qui ne peut être réalisée que par la compréhension, à l'échelle microstructurale, du multi-phasage qui constitue le paramètre clé de la conception de ces aciers.

Jusqu'aujourd'hui, les sidérurgistes et métallurgistes s'inspirent beaucoup de l'expérience en comparant les propriétés mécaniques obtenues au travers de différents cycles avec les paramètres microstructuraux classiquement observables comme la taille de grain, la fraction volumique, leur morphologie etc. Ces paramètres microstructuraux peuvent être ajustés à l'aide des cycles thermiques d'élaboration de ces aciers. L'aspect mécanique est principalement étudié à l'échelle macroscopique, celle de la tôle d'acier ou de la pièce. Peu d'études se concentrent sur l'aspect mécanique du « multiphasage » c'est-à-dire à l'étude de l'interaction mécanique entre les phases au sein même de la microstructure. Une première étude [1] a proposé de modéliser le comportement global d'aciers Q&P à partir de lois locales des différentes phases. Cette approche constitue une avancée dans la volonté d'optimiser les aciers de 3<sup>ème</sup> génération, à partir du comportement mécanique local de ses constituants. Cependant, le domaine d'application de ce type d'approche reste encore limité du fait de l'utilisation de lois de comportement phénoménologiques unidimensionnelles et de lois de transition d'échelle ne rendant compte d'aucune interaction mécanique entre phases.

Si l'objectif pour le concepteur est de prédire le comportement mécanique macroscopique de l'acier, le modèle doit être tri-dimensionnel afin de rendre compte des changements de trajets de déformation (mise en forme des pièces, tenue en service, crash etc.). De plus, ces lois de comportement tri-dimensionnelles doivent être identifiées à partir de longueurs internes microstructurales observables, quantifiables. De fait, il sera alors possible, en jouant sur les traitements thermiques

de changer ses longueurs microstructurales et ainsi espérer, en optimisant le comportement local des phases, obtenir le comportement macroscopique visé.

L'objectif de ce projet de thèse est donc de proposer une approche nouvelle de modélisation micromécanique visant à optimiser le « multiphasage » en proposant non seulement des lois locales pour chacune des phases mais également en tenant compte des interactions mécaniques existantes aux interfaces des différentes phases par une approche multi-échelle visant à intégrer les effets de longueurs internes microstructurales.

### **Programme de travail prévisionnel :**

Ce projet s'articulera suivant deux axes principaux de travail, **un volet expérimental et un volet théorique et numérique :**

#### **1. L'identification des longueurs internes microstructurales pouvant décrire le comportement mécanique de chacune des phases et leur interaction.**

Cette identification des longueurs internes microstructurales fait défaut aujourd'hui dans la littérature et l'objectif de ce projet est de progresser avant tout dans ce domaine. Il convient ainsi d'identifier expérimentalement les paramètres microstructuraux sur lesquels le métallurgiste pourra agir afin d'optimiser le comportement global de l'acier. Afin de décrire mécaniquement la rhéologie à l'échelle locale des phases, cet axe de travail propose d'aller plus loin en couplant l'observation fine (MEB, FEG, EBSD) à une caractérisation mécanique. Dans le domaine de la caractérisation mécanique, la nanoindentation a fait des progrès considérables ces dernières années prouvant la maturité de la technologie pour caractériser les défauts dans les matériaux cristallins [2,3]. Cette technologie pourrait donc servir, en plus de la technique EBSD (electron-back-scattered diffraction) déjà utilisée à ArcelorMittal, à identifier, de manière originale, à l'échelle du micron ou submicronique les longueurs internes microstructurales par exemple : taille des grains, taille caractéristique en jeu dans les différentes phases métallurgiques en présence, différentes phases, couche de GND autour des phases dures en cours de plasticité (GND : dislocations « géométriquement nécessaires » [4]) et à valider les évolutions des champs locaux entre phases (écrouissage, effet de taille au joints de phases, empilement de dislocations GND aux interfaces etc.) pendant la déformation. Ce travail sera réalisé sur des aciers modèles monophasés et biphasés dans un premier temps puis sur des aciers multiphasés industriels de 3<sup>ème</sup> génération. Cela permettra d'affiner le comportement local de certaines phases encore peu/mal connu (martensite, austénite résiduelle...). Tout ou partie de cet axe de travail constituera déjà un grand intérêt pour le sidérurgiste du point de vue de la compréhension du lien entre microstructure et propriétés mécaniques.

## 2. L'élaboration d'un modèle micromécanique à longueurs internes microstructurales.

Intégrer des longueurs internes microstructurales dans des modèles micromécaniques est une démarche peu relatée dans la littérature. Des premières études dans ce sens ont déjà eu lieu sur des aciers plus simples ou « modèles » [5,6]. Ces études ont décrit un effet de taille de grain/taille de particules sur des aciers conventionnels en intégrant une longueur interne microstructurale dans un modèle à champs « moyens » de type « autocohérent » classique [5] ou « autocohérent généralisé » [6] en élasto(visco)plasticité. Dans ce projet, un nouveau modèle micromécanique à champs moyens intégrant les longueurs internes microstructurales préalablement identifiées sera développé au cours de la thèse. Ce modèle original devrait permettre dans le cadre de la plasticité isotrope dans un premier temps de décrire le comportement d'aciers 3<sup>ème</sup> génération à partir des interactions mécaniques entre les phases le constituant. Un code numérique constituera un atout précieux pour le sidérurgiste dans la conception de nouvelles nuances d'acier mais aussi dans la compréhension du lien propriétés-microstructure au travers du « multiphasage ». Il pourra être également implémenté dans un code d'éléments finis de type Abaqus et adapté aux routines utilisateurs déjà utilisées en interne par ArcelorMittal. Des simulations micromécaniques à champs complets par méthode FFT (« Fast Fourier Transformation » : transformées de Fourier rapide) [7-9] avec prise en compte de la topologie exacte des phases et des longueurs internes viendront compléter les simulations numériques afin de valider les résultats du modèle à champs « moyens ». Notamment, une approche de plasticité à gradient de type « mécanique des champs de dislocations » [10] sera mise à profit pour étudier les aciers de 3<sup>ème</sup> génération choisis pour cette thèse.

### Résultats attendus :

A terme, les travaux de cette thèse aboutiront :

- à une identification originale des longueurs internes microstructurales régissant le comportement local des différentes phases caractéristiques d' un acier de 3<sup>ème</sup> génération,
- à une identification originale par nanoindentation des effets de taille de longueurs internes,
- à une meilleure compréhension de l'évolution des champs locaux au sein des phases d'un acier multiphasé pendant sa déformation pour accéder aux points « faibles » de la microstructure en termes de sites préférentiels d'endommagement,
- à la création d'un outil micromécanique à champs moyens intégrant des longueurs internes permettant de décrire le comportement global d'un l'acier multiphasé à partir du comportement local de ses phases,

- à une implémentation de ce code tri-dimensionnel dans un logiciel de code d'éléments finis au travers d'une routine utilisateur existante de l'entreprise à des fins de simulations numériques (sous le logiciel EF commercial Abaqus),
- à une avancée majeure sur la maîtrise du « multiphasage » et de ses effets mécaniques. Le concepteur d'acier sera en mesure d'optimiser les propriétés mécaniques (sorties du modèle) de ses nouvelles nuances d'acier en modifiant les longueurs internes microstructurales (entrée du modèle) au travers des traitements thermiques industriels (actionneurs process).

## Références :

- [1] A. Arlazarov, O. Bouaziz, J.P. Masse, F. Kegel, Mater. Sci. Eng A620 (2015), pp. 293-300.
- [2] G. Z. Voyiadjis, M. Yaghoobi. Review of Nanoindentation Size Effect: Experiments and Atomistic Simulation Crystals 2017, 7(10), 321.
- [3] C. Caer, E. Patoor, S. Berbenni, J.-S. Lecomte, Stress-induced pop-in and pop-out events in CuAlBe shape memory alloys, Materials Science and Engineering A, Vol. 587, 304-312, 2013.
- [4] M.F. Ashby, Philos. Magazine 21 (1970), 399-424.
- [5] J.-M. Pipard, N. Nicaise, S. Berbenni, O. Bouaziz, M. Berveiller. Computational Materials Science 45 (2009) pp. 604-610.
- [6] V. Taupin, R. Pesci, S. Berbenni, S. Berveiller, R. Ouahab, O. Bouaziz, Mater. Sci. Eng A561(2013) pp. 67-77.
- [7] H. Moulinec, P. Suquet, 1994. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris II 318 (1994), 1417-1423.
- [8] S. Berbenni, V. Taupin, K.S. Djaka, C. Fressengeas. International Journal of Solids and Structures 51(2014) pp. 4157-4175.
- [9] K.S. Djaka, A. Vilani, V. Taupin, L. Capolungo, S. Berbenni. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 315 (2017) pp. 921-942.
- [10] A. Roy, S. Puri, A. Acharya, Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 15 (2007), 167-180.

### **Profil recherché :**

Pour ce travail de thèse, nous recherchons un(e) candidat(e) motivé(e) pour la science des matériaux avec une formation solide en mécanique des matériaux, milieux continus. Le (la) candidat(e) devra en outre avoir un goût prononcé à la fois pour les techniques expérimentales aux échelles fines (nanoindentation) et le développement de codes numériques de type mécaniques (simulation numérique).

### **Laboratoires d'accueil académique et industriel de la thèse :**

Cette thèse se déroulera au sein du laboratoire LEM3 (Metz) et au sein d'ArcelorMittal Maizières Research (Centre de Maizières-lès-Metz, Moselle).

Le LEM3 (<http://lem3.univ-lorraine.fr>) est une Unité Mixte de Recherche n° 7239 CNRS - Université de Lorraine - Arts et Métiers ParisTech, rattachée principalement à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS) du CNRS. Les domaines d'activité du LEM3 concernent : les Matériaux, la Mécanique, l'étude des Microstructures et des Procédés des matériaux, modélisation micromécanique, méthodes numériques.

Le site ArcelorMittal de Maizières-Lès-Metz est le plus grand centre de recherche et développement du groupe. Il est divisé en trois pôles : produits (automobile et emballage), le développement des procédés d'élaborations et la transformation des minerais. La thèse se déroulera dans le département Produits Automobiles dont l'objectif principal est de concevoir et développer de nouveaux aciers à hautes performances pour répondre aux attentes et exigences du secteur automobile.

### **Équipe encadrante, contacts :**

Directeur de thèse : Dr. Stéphane Berbenni (Directeur de recherche CNRS, HDR)

Email : [stephane.berbenni@univ-lorraine.fr](mailto:stephane.berbenni@univ-lorraine.fr) (LEM3, Univ. Lorraine /CNRS, Arts et Métiers)

Co-Directeur de thèse : Dr. Thiebaud Richeton (Chargé de recherche CNRS, HDR)

Email : [thiebaud.richeton@univ-lorraine.fr](mailto:thiebaud.richeton@univ-lorraine.fr) (LEM3, Univ. Lorraine /CNRS/ Arts et Métiers)

Encadrant de thèse à ArcelorMittal : Dr. Jean-Marc Pipard (Ingénieur de Recherche, ArcelorMittal)

Email : [jean-marc.pipard@arcelormittal.com](mailto:jean-marc.pipard@arcelormittal.com)

Co-Encadrant de thèse à ArcelorMittal : Dr. Artem Arlazarov (Ingénieur de Recherche, ArcelorMittal)



ArcelorMittal

Email : [artem.arlazarov@arcelormittal.com](mailto:artem.arlazarov@arcelormittal.com)

**LEM3**  
LABORATOIRE D'ÉTUDE DES MICROSTRUCTURES  
ET DE MÉCANIQUE  
DES MATÉRIAUX