

Identification de loi de comportement à partir des résultats d'essai Small Punch Test et par une approche IA : application à des aciers faiblement alliés

Mot clés : Essai mécanique, Acier, Microstructure, Modélisation FEM, Intelligence artificielle, Couplage numérique-expérimental

Contexte :

La décarbonation de l'industrie sidérurgique et l'arrêt à venir des hauts fourneaux vont impliquer un essor massif des filières électriques et une augmentation de la consommation en ferrailles issues du recyclage. Ces ferrailles constituent un apport d'éléments résiduels qui ne peuvent pas être éliminés de l'acier liquide avec les technologies actuelles d'élaboration. Ces derniers impactent la formation des microstructures ainsi que les propriétés finales de l'acier produit (ténacité, ductilité, soudabilité...). Afin de permettre à la sidérurgie nationale et européenne de conserver un avantage concurrentiel, le projet OPTISCRAPS (Lever les verrous de la sidérurgie verte par l'utilisation optimisée des ferrailles et leurs résiduels et par le design dynamique d'alliages) vise à accélérer le développement et le déploiement de modèles métallurgiques permettant un pilotage dynamique des procédés de fabrication aval (recuit continu des produits plats), pour tenir compte de la variabilité de ces nouveaux éléments résiduels (Mo, Sn, Sb, As, ...). Toutefois, les connaissances manquent sur les possibles effets de ces éléments (thermodynamique, ségrégations, transformations de phases, propriétés mécaniques). Compte tenu du nombre de combinaisons possibles entre ces éléments, souhaitées ou subies, seule la mise en œuvre des méthodes à haut débit, appuyées par des modèles d'apprentissage automatisé permettra d'étudier, dans les délais attendus par l'industrie, leurs effets respectifs et leurs interactions.

Pour atteindre ces objectifs, la stratégie scientifique du projet scientifique OPTISCRAPS se décline en 3 volets fortement interconnectés et interdisciplinaires : 1. Conception et caractérisation in situ de microstructures par des approches à haut débit, 2. Caractérisation multi échelles avancée des microstructures post mortem, 3. Modélisation multiéchelle hybrides assistée par des méthodes d'apprentissage automatisé. Une des innovations de ce projet est l'extension des méthodes de caractérisation à haut débit en métallurgie combinatoire jusqu'aux propriétés mécaniques, ceci par l'utilisation de l'essai Small Punch tests (SPT). C'est dans cet axe que se situe le travail de thèse ci-dessous présenté.

Le sujet de thèse :

Le Small Punch Test (SPT) est une méthode expérimentale largement utilisée pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux, notamment pour les échantillons de petite taille ou dans des conditions où d'autres essais seraient difficiles à réaliser. Ce test permet d'évaluer des paramètres tels que la résistance, la ductilité, et la ténacité à partir de l'analyse de la déformation sous une charge appliquée sur un échantillon mince. Cependant il ne permet pas actuellement de déterminer la loi de comportement mécanique complète du matériau. Il a été et est largement utilisé pour rendre compte d'évolution de comportement mécanique de matériaux métalliques après irradiation, vieillissement thermique ou en contact avec un environnement.

Pour le projet OPTISCRAPS, l'enjeu de l'étude des propriétés mécaniques est de déterminer l'impact des évolutions des microstructures sur le comportement mécanique des matériaux. Dans le cadre de ce projet nous nous limiterons aux caractéristiques d'élasto-plasticité monotone des matériaux. Un des défis est de pouvoir déterminer les grandeurs mécaniques caractéristiques d'un essai de traction à partir d'échantillon homogène d'un point de vue de leur microstructure et donc de petite taille. C'est pourquoi, l'essai SPT, qui met en œuvre

des échantillons de petites tailles (typiquement disque de 8 mm de diamètre et 0,5 mm d'épaisseur) a été choisi avec lors de la thèse l'étude d'une évolution vers des échantillons plus petits (4 mm de diamètre et 0,25 d'épaisseur), permettant le couplage avec les autres moyens mis en œuvre dans le projet. L'effet d'échelle dans la détermination des lois de comportement sera étudié. Afin de déterminer les propriétés mécaniques à partir des résultats de SPT, dans la suite de travaux déjà existants, une simulation avec approche inverse sera menée par l'étudiant en thèse. Son originalité sera dans la mise en œuvre d'une approche par IA physiquement fondée permettant une détermination non pré-définie des lois de comportement. De plus, l'essai de SPT sera instrumenté afin de conforter l'approche et définir les mesures les plus pertinentes lors de l'essai SPT. Des essais de traction menés aux mêmes échelles (sur mini éprouvette en MEB avec suivi de la déformation) seront menés afin de valider la méthodologie et d'en définir les limites. Enfin, le second défi est une systématisation de cette détermination à « haut » débit, ce qui devrait permettre d'étudier l'influence des évolutions des microstructures sur les lois de comportement et caractéristiques mécaniques des aciers suivant les éléments résiduels issus des ferrailles.

Equipe d'encadrement : I. Proriol Serre (UMET) et V. Magnier (LaMcube)

Laboratoires et équipes de recherche :

La thèse se déroulera au sein de deux laboratoires de l'université de Lille: le laboratoire UMET-CNRS UMR 8207 (<https://umet.univ-lille.fr/>) et le laboratoire LaMcube-CNRS UMR 9013 (<http://lamcube.univ-lille.fr/fr>)

Date de démarrage de thèse et financement de la thèse

La thèse devra démarrer entre mars 2025 et octobre 2025. Elle est prévue pour une durée de 3 ans.

Les travaux de thèse ainsi que le salaire du thésard seront financés dans le cadre d'un projet du PEPR DIADEME, le projet OPTISCRAPS.

Profil recherché

Le/la candidat/e, ayant un cursus mécanique et matériaux, doit avoir un goût prononcé pour les méthodes numériques et posséder des connaissances en mécanique des solides. Il/elle devra aussi avoir le gout pour mener des essais mécaniques, les exploiter et comprendre les effets des évolutions de la microstructure sur les propriétés mécanique. Il/elle devra coupler des résultats de simulations à des résultats expérimentaux. Enfin, travaillant au sein de deux laboratoires et dans un projet plus vaste (OPTISCRAPS), il/elle devra présenter les qualités humaines et relationnelles permettant un travail en interaction avec différents interlocuteurs.

Contact

Si vous êtes intéressés, merci d'envoyer une lettre de motivation, un CV et vos relevés de notes à :

Ingrid Proriol Serre (Directrice de Recherche, CNRS) : ingrid.proriol-serre@univ-lille.fr

Vincent Magnier (Maitre de Conférences, ULille) : vincent.magnier@polytech-lille.fr

Le poste se situe dans un secteur relevant de la protection du potentiel scientifique et technique (PPST) et nécessite donc, conformément à la réglementation, que votre arrivée soit autorisée par l'autorité compétente du MESR.

Identification of behaviour law from Small Punch Test results and by an AI approach: application to low-alloy steels

Keywords: Mechanical testing, Steel, Microstructure, FEM modelling, Artificial intelligence, Numerical-experimental coupling

Context:

The decarbonization of the steel industry and the upcoming shutdown of blast furnaces will involve massive challenges in electrical sectors and an increase in the consumption of scrap metals from recycling. This scrap metals contribute to residual elements that cannot be eliminated from liquid steel with current production technologies. This impacts the formation of microstructures as well as the final properties of the steel produced (toughness, ductility, weldability, etc.). In order to enable the national and European steel industry to maintain a competitive advantage, the OPTISCRAPS project (Lifting the locks of the green steel industry through the optimized use of scraps and their residuals and the dynamic design of alloys) aims to accelerate the development and deployment of metallurgical models allowing dynamic management of manufacturing processes (continuous annealing of flat products), to take into account the variability of these new residual elements (Mo, Sn, Sb, As, etc.). However, knowledge is lacking on the possible effects of these elements (thermodynamics, segregations, phase transformations, mechanical properties). Given the number of possible combinations between these elements, desired or undergone, only the implementation of high-speed methods, supported by automated learning models, will make it possible to study, within the timeframes expected by the industry, their respective effects and their interactions.

To achieve these objectives, the scientific strategy of the OPTISCRAPS scientific project is divided into 3 highly interconnected and interdisciplinary components: 1. in situ design and characterization of microstructures using high-speed approaches, 2. advanced multi-scale characterization of post-mortem microstructures, 3. hybrid multi-scale modelling assisted by automated learning methods. One of the innovations of this project is the extension of high-speed characterization methods in combinatorial metallurgy to mechanical properties, through the use of the Small Punch tests (SPT). The thesis work presented below is located in this axis.

PhD subject:

The Small Punch Test (SPT) is a used experimental method to characterize the mechanical properties of materials, especially for small samples or in conditions where other tests would be difficult to perform. This test allows to evaluate parameters such as strength, ductility, and toughness from the analysis of deformation under a load applied to a thin sample. However, it does not currently allow to determine the complete mechanical behaviour law of the material. SPT has been and is used to report changes in the mechanical behavior of metallic materials after irradiation, thermal aging or in contact with an environment.

For the OPTISCRAPS project, the challenge of studying mechanical properties is to determine the impact of microstructure changes on the mechanical behaviour of materials. In the context of this project, we will consider only the monotonic elastoplasticity characteristics of materials. One of the challenges is to be able to determine the mechanical quantities characteristic of a tensile test from a sample that is homogeneous from the point of view of their microstructure and therefore small in size. This is why the SPT test, which uses small samples (typically 8 mm diameter and 0.5 mm thick disks) was chosen. Moreover, during the thesis, the study of an

evolution towards smaller samples (4 mm diameter and 0.25 thick), allowing coupling with the other means implemented in the OPTISCRAPS project will be studied. Then, the scale effect in determining the behavior laws will be studied.

In order to determine the mechanical properties from the SPT results, in the continuation of already existing work, a simulation with inverse approach will be carried out by the thesis student. Its originality will be in the implementation of a physically based AI approach allowing a non-predefined determination of the behavior laws. In addition, the SPT test will be instrumented in order to reinforce the approach and define the most relevant measurements during the SPT test. Tensile tests carried out at the same scales (with very small specimens and insitu-SEM tensile tests) will be carried out in order to validate the methodology and define its limits. Finally, the second challenge is a systematization of this determination at "high" throughput, which should make it possible to study the influence of microstructure changes on the behavior laws and mechanical characteristics of steels according to the residual elements from scraps.

Supervisory team: I. Proriol Serre (UMET) and V. Magnier (LaMcube)

Laboratories and research teams:

The thesis will be carried out in two laboratories of the University of Lille: the UMET-CNRS UMR 8207 laboratory (<https://umet.univ-lille.fr/>) and the LaMcube-CNRS UMR 9013 laboratory (<http://lamcube.univ-lille.fr/fr>). The two laboratories are located in the site "cite scientifique" of the Lille University (Villeneuve d'Ascq, France).

Thesis start date and thesis funding

The thesis should start between March 2025 and October 2025. It is planned for a duration of 3 years. The thesis work as well as the salary of the thesis student will be financed within the framework of a french PEPR DIADEME project, the OPTISCRAPS project.

Desired profile

The candidate, with a background in mechanics and materials, should have knowledge for numerical methods and in solid mechanics. He/she should have a background for conducting mechanical tests, exploiting them and understanding the effects of microstructure changes on mechanical properties. He/she will have to couple simulation results with experimental results. Finally, working in two laboratories and in a larger project (OPTISCRAPS), he/she will have to present the human and relational qualities allowing work in interaction with different interlocutors.

Contact

If you are interested, please send a cover letter, a CV and your transcripts to:
Ingrid Proriol Serre (Research Professor at CNRS): ingrid.proriol-serre@univ-lille.fr
Vincent Magnier (Assistant Professor ULille): vincent.magnier@polytech-lille.fr

The position is located in a sector falling under the protection of scientific and technical potential (PPST) and therefore requires, in accordance with regulations, that your arrival be authorized by the competent authority of the MESR.