

## Thèse : Étude expérimentale et numérique de l'influence de la géométrie d'une porosité sur sa fermeture en laminage

### Contexte :

La maîtrise de la qualité interne des semi-produits laminés à chaud est un enjeu important pour les sidérurgistes aujourd'hui. Celle-ci permet d'améliorer les propriétés d'emploi et de mise en œuvre des aciers et donc de permettre d'accompagner la diminution de l'engagement matière et le downsizing de certains secteurs industriels comme l'automobile. Dans ce contexte, ABS, produisant des barres d'acier laminées à chaud, cherche à améliorer la santé interne de ces produits en agissant sur la gamme de laminage.

Les semi-produits sont laminés à partir de lingots ou de blooms issus de coulée continue. Ceux-ci contiennent des défauts que sont les inclusions et les retassures et qui doivent être réduits au cours du laminage. Les gammes de laminage doivent donc être conçues de façon à obtenir les dimensions du produit voulues tout en générant les sollicitations thermomécaniques nécessaires à la fermeture des porosités initiales et la fragmentation et la dispersion des inclusions. La simulation par éléments finis est l'outil numérique classique utilisé pour assister le dimensionnement des gammes. L'objectif est de se doter de modèles d'évolution des défauts prédictifs qui seront intégrés dans la simulation numérique du procédé pour définir des processus de mise en forme efficaces en termes de réduction de l'impact des défauts sur les performances des aciers considérés. Ces modèles doivent toutefois être identifiés sur des cas de chargement et pour des structures initiales proches des conditions industrielles afin d'y intégrer tous les facteurs influents pour améliorer la santé interne des produits mis en forme. Le développement de plan d'expériences sur les installations industrielles n'étant pas envisageables, il est nécessaire de passer par des essais à plus petite échelle mais représentatifs des conditions industrielles pour effectuer cette démarche d'identification.

Les travaux de recherche proposés se concentrent sur le phénomène de fermeture de porosité.

ACM, le centre de recherche d'ABS, et le LCFC se sont dotés d'un outil et d'un protocole permettant à une échelle réduite de reproduire les sollicitations thermomécaniques appliquées par le laminoir industriel et de mettre en œuvre des retassures naturelles (Voir Figure 1). Plus précisément, l'essai permet d'appliquer les mêmes niveaux de déformation et de triaxialité des contraintes et reproduit l'alternance des directions de déformation. Le principe de l'essai consiste à écraser un barreau entre des enclumes de forme reproduisant à échelle réduite la forme des rouleaux du laminoir industriel. Entre chaque écrasement, le barreau est tourné de 90° pour reproduire l'alternance des directions de mise en forme. Les porosités mises en œuvre sont des retassures naturelles produites par un protocole développé spécifiquement. Le suivi expérimental de la fermeture de porosité se fait par contrôle par tomographie aux rayons X. Un modèle de simulation par éléments finis de l'essai a été développé et validé dans le cas d'un chargement monotone. Il s'agit d'un modèle à champs complets intégrant la géométrie de la porosité.

Les résultats obtenus à ce jour ont permis de mettre en exergue les paramètres ayant un impact important sur la fermeture des porosités. Outre la déformation plastique et la triaxialité des contraintes dont l'importance a été confirmée, l'alternance des directions de déformation, typique du laminage de produits longs, joue un rôle primordial dans la fermeture de porosité. La géométrie de la porosité et son orientation par rapport au chargement thermomécanique vont également avoir une influence déterminante sur la fermeture. De même, les irrégularités de la géométrie des retassures

vont être à l'origine de la formation de cavités résiduelles qui vont nécessiter une déformation supplémentaire pour leur fermeture complète.

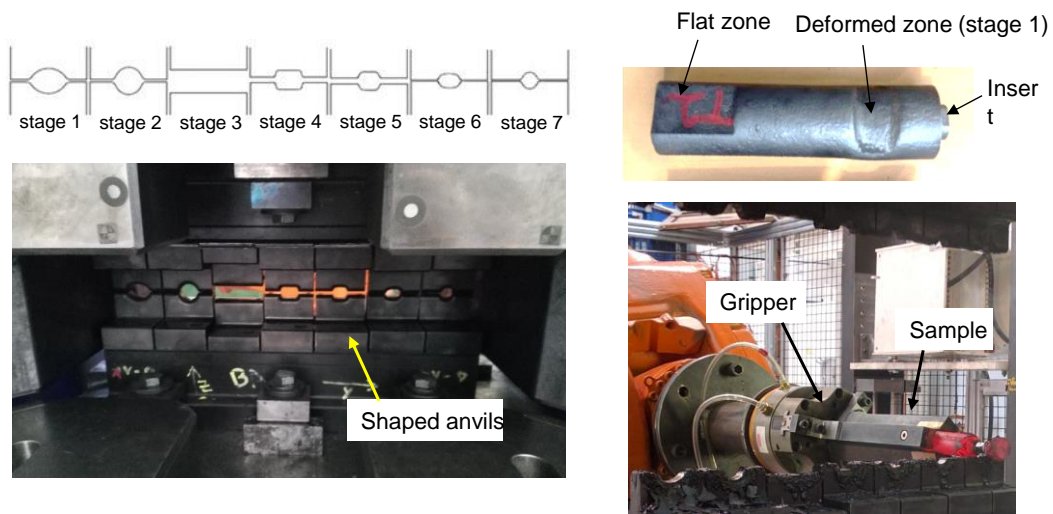


Figure 1 : Essai représentatif pour la simulation expérimentale du laminage à chaud

Les objectifs des travaux de thèse visent à mettre en œuvre un plan d'expériences numériques qui permette l'identification et la validation d'un (méta)modèle de fermeture de porosité pour des chargements et des géométries de retassures caractéristiques du laminage industriel de blooms issus de coulée continue.

#### Programme scientifique :

La démarche proposée pour atteindre les objectifs des travaux de thèse est dans un premier temps de mettre en place et de valider un modèle de simulation par éléments finis en champ complet. La validation se fera par comparaison des résultats de simulation avec des résultats expérimentaux obtenus pour des chargements complexes avec alternance des directions de déformation. La validation devra couvrir un spectre de chargement thermomécanique et de géométrie (incluant l'orientation, la taille, les facteurs de forme et la tortuosité) de porosités assez large tout en restant représentatif des conditions industrielles. Le modèle obtenu sera ensuite utilisé dans le cadre d'un plan d'expérience numérique. Les paramètres d'entrée de ce plan seront ceux caractérisant le chemin thermomécanique et la géométrie des retassures. Les résultats du plan d'expérience serviront ensuite à mettre en place un (méta)modèle de fermeture des porosités dans le cas particulier du laminage à chaud.

Le travail de thèse comporte quatre volets :

##### 1. Modélisation et simulation :

Cette partie du travail consiste à consolider et valider la modélisation en champs complets de la fermeture d'une porosité. Le point de départ de cette partie du travail est le modèle de simulation mis en place par Pondaven dans ses travaux de thèse [Pondaven 2021]. Ce modèle doit être capable de suivre l'évolution de la géométrie d'une porosité (incluant un certain niveau de sa tortuosité) lors de trajets de déformation complexes comportant des alternances de directions de déformation. Une étude numérique approfondie permettra d'étudier les performances du modèle en ce qui concerne le niveau de détail qu'il est possible de prendre en compte. Ceci permettra de définir le niveau de

description de la porosité initiale et la taille limite jusqu'où il est possible de suivre la porosité au cours de sa fermeture.

## *2. Développement expérimental de l'essai représentatif :*

Le développement des essais de mise en forme s'appuiera sur l'essai existant mis en place au cours des thèses de Chevalier [Chevalier 2016] et Pondaven [Pondaven 2021]. L'essai existant est constitué d'opérations d'écrasement d'une barre entre des enclumes de forme reproduisant à échelle réduite la géométrie des surfaces actives des rouleaux de laminage industriel. Entre chaque écrasement la barre est tournée de 90° pour reproduire l'alternance des directions de déformation du laminage industriel. L'essai à développer consistera à mettre en œuvre le même type d'essais mais avec des enclumes de géométrie standard (Plat, V) afin d'étendre les domaines atteignables par l'essai en termes de sollicitations thermomécaniques. Une partie de l'étude se concentrera sur la répétabilité de l'essai.

Une partie de cette tâche sera consacrée à la caractérisation et à la qualification de la mesure par tomographie aux rayons X des porosités dans les éprouvettes.

## *3. Validation du modèle à champs complets*

L'essai représentatif de la partie précédente sera mis en place en parallèle de son modèle de simulation par éléments finis. Ce modèle sera validé sur un ensemble de géométries de porosité et sur un ensemble de gammes de mise en forme. Les géométries testées seront choisies parmi celles disponibles (retassures naturelles contrôlées ou retassure extraites de bloom) et les gammes feront intervenir les enclumes de forme standard avec des paramètres de mise en forme qui seront à définir. Cette étape de validation devra couvrir une variété de géométries de porosité et de chemins thermomécaniques les plus larges possibles pour obtenir le domaine de validité du modèle le plus vaste possible.

## *4. Plan d'expériences numériques*

Le modèle en champs complets obtenus à l'étape précédente sera utilisé pour effectuer un plan d'expériences numérique. Les données d'entrée de ce plan sont les paramètres de mise en forme (géométrie d'enclume, course de déformation...) et les paramètres caractérisant la géométrie de la porosité. Parmi ces derniers, on trouvera les paramètres définissant la géométrie l'orientation de l'ellipsoïde équivalent tel que défini par [Saby 2013]. Une étude de sensibilité de la fermeture vis-à-vis de ces différents paramètres sera ainsi menée.

Les données obtenues pourront être utilisées ensuite pour la mise en place d'un modèle à champ moyen spécifique à la fermeture de porosité en laminage de barres.

### *Recherche bibliographique*

Une étude bibliographique devra être menée sur le phénomène de fermeture de porosité et sur sa modélisation. La technique de mesure par tomographie aux Rayons X devra également faire l'objet d'une recherche bibliographique poussée. Une attention particulière devra être portée sur l'identification des limites de cette technologie et les méthodes et moyens de la qualifier.

La caractérisation de tortuosité des porosités est une question restée ouverte. La représentation de la porosité par des ellipsoïdes ne permet de reproduire de façon satisfaisante la formation des cavités résiduelles au cours de la fermeture. Certains détails de la tortuosité peuvent également, en fonction de leur forme et de leur orientation, provoquer une réouverture de la porosité.

## Planning prévisionnel

Tâche		S1	S2	S3	S4	S5	S6
T0	Biblio						
T1	Caractérisation géo porosité						
T2	Validation expérimentale de la simulation						
T3	Etude paramétrique numérique						
	Rédaction						

### Profil recherché :

Le (la) candidat(e) devra disposer d'un diplôme master II ou d'un diplôme d'ingénieur en ingénierie mécanique ou en matériau. Le (la) candidat(e) devra posséder des compétences en simulation numérique des procédés, en déformation plastique à chaud et une affinité pour l'expérimentation et le traitement des données. Une maîtrise de l'anglais est également nécessaire.

### Organisation

La thèse se déroulera dans le cadre d'un partenariat entre ACM (centre de recherche de l'aciériste ABS) et le LCFC (EA4495, Laboratoire de Conception Fabrication Commande du campus Arts et Métiers de Metz). Le doctorant effectuera ses travaux sur les sites du LCFC et de ACM et pourra être amené à se déplacer sur le site d'ABS (Udine – Italie) pour effectuer des mesures. Le doctorant partagera son temps entre le site industriel et l'unité de recherche, son adaptation sera facilitée par la proximité géographique entre les deux partenaires.

La thèse d'une durée de 3 ans s'effectuera sur la période octobre 2022 - septembre 2025

### Encadrement :

La thèse sera dirigée par le Professeur Régis BIGOT et co-encadrée par le MCF Laurent LANGLOIS et se déroulera au sein de l'École Doctorale Sciences des Métiers de l'Ingénieur.

### Contacts :

Régis BIGOT, Professeur au LCFC : [regis.bigot@ensam.eu](mailto:regis.bigot@ensam.eu)

Laurent LANGLOIS, Maître de Conférence au LCFC : [laurent.langlois@ensam.eu](mailto:laurent.langlois@ensam.eu)

Corentin PONDAVEN, Ingénieur de recherche à ACM : [c.pondaven@absacciai.com](mailto:c.pondaven@absacciai.com)

### Références :

[Pondaven 2021] Pondaven Corentin. 2021. « Contribution à l'étude du phénomène de fermeture de porosités en laminage à chaud : mise en place d'une modélisation expérimentale et numérique à représentativité améliorée ». Thèse de doctorat

[Chevalier 2016] Chevalier, Damien. 2016. « Contribution à la compréhension du couplage thermomécanique en laminage à chaud sur l'évolution des défauts de coulée ». Thèse de doctorat

[Saby 2013] Saby, M., M. Bernacki, E. Roux, et P. -O. Bouchard. 2013. « Three-dimensional analysis of real void closure at the meso-scale during hot metal forming processes ». *Computational Materials Science*