

Offre de Thèse 2024- CEMEF

TITRE	Caractérisation et modélisation de la relaxation de l'effet Bauschinger, de la restauration et du comportement mécanique d'un acier martensitique.
Acronyme du projet	CAMERAM
Modalités d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant	Selon les règles de l'Ecole Doctorale SFA (Université Côte d'Azur) et de la Spécialité Doctorale « Mécanique Numérique et Matériaux » de l'Ecole des Mines de Paris : 1. en 1^{ère} année, rapport et soutenance bibliographique (Février) 2. en 1^{ère} année, rapport et soutenance d'avancement (Juin) ; 3. en 2^{ème} année, réunion du Comité de Suivi Individuel de Thèse (Juin-Juillet). Les travaux feront l'objet d'échanges constants entre le doctorant, l'équipe encadrante et l'entreprise, et de réunions formelles trimestrielles avec fourniture préalable de documents et rédaction de comptes-rendus a posteriori.
Objectif général	L'objectif est de modéliser l'évolution des propriétés mécaniques d'un tube en acier martensitique revenu, lors d'une opération de finition consistant en une légère déformation plastique de l'extrémité suivie d'un recuit de détensionnement. Cette évolution, induites par celles de la microstructure, est causée par les mécanismes de plasticité (écrouissage isotrope et cinématique), la restauration statique et la relaxation de l'effet Bauschinger. Pour cela, le candidat ou la candidate devra : • conduire une campagne expérimentale de traitement thermique et de caractérisation mécanique en condition cyclique, • identifier les modèles de comportement et de restauration adaptés au matériau [1,2,3], • identifier les paramètres de ces modèles, • implémenter les modèles dans le logiciel éléments finis Forge en vue d'une simulation prédictive, à l'aide de ces connaissances, définir des conditions de traitement thermique, les réaliser en vraie grandeur et confronter les prédictions du modèle aux mesures.



Figure 1 : Exemple de jonction de tubes filetée

Présentation détaillée

Vallourec est un des principaux producteurs de tubes en acier. Il est en particulier leader mondial dans le développement, la commercialisation et l'utilisation de connexions filetées « premium » à haute performance, avec portée d'étanchéité métal-métal, entre ces tubes. Ces connexions sont utilisées dans de nombreuses applications industrielles en lien avec l'exploitation des énergies qu'elles soient fossiles, comme le pétrole ou le gaz naturel, ou vertes, comme la géothermie. Actuellement, **Vallourec** cherche et développe d'autres applications de ces connexions dans le captage et le stockage du dioxyde de carbone dans les couches géologiques ou dans les anciens puits de pétrole et de gaz. Une utilisation dans des puits de stockage d'hydrogène est aussi à l'étude. Les conditions d'utilisation extrêmes de ces structures (jusqu'à 3000 t de traction/compression, jusqu'à 200 MPa de pression interne/externe, et avec des températures entre l'ambiante et 250°C) imposent un cahier des charges très exigeant dans leur développement.

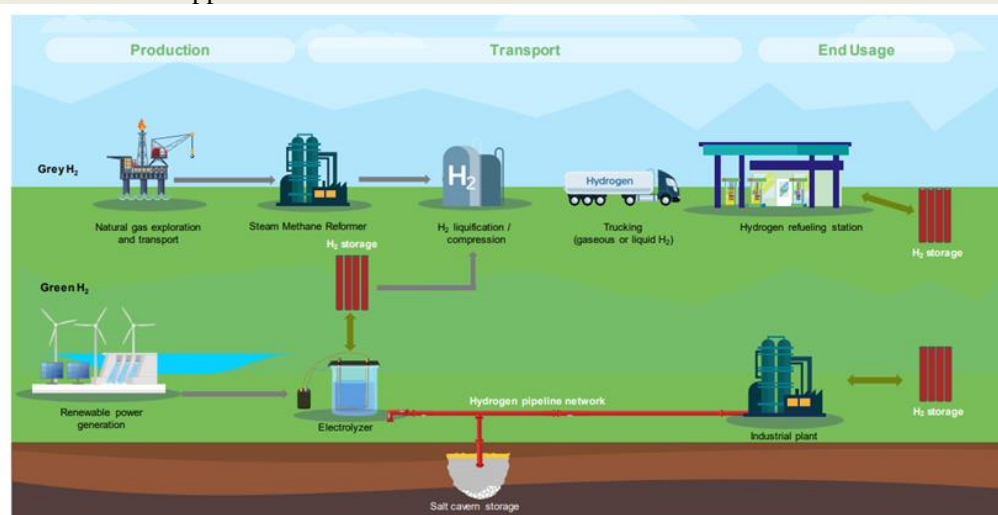


Figure 2 : la chaîne de valeur de l'hydrogène comme vecteur énergétique

La problématique industrielle de cette thèse concerne essentiellement les connexions premiums intégrales qui sont usinées sur des extrémités de tubes en acier martensitique, à haute limite élastique YS, préalablement déformées à froid puis « détensionnées » via un traitement thermique réalisé dans une bobine d'induction.

L'opération de déformation plastique à froid des extrémités des tubes, en expansion ou rétreint, modifie les caractéristiques mécaniques de la martensite, faisant apparaître en particulier l'effet Bauschinger (figure 2) : après une déformation compressive, un essai de traction donne un seuil de plasticité apparent nettement plus bas, ce qui montre que des déformations plastiques locales peuvent apparaître à des contraintes bien inférieures aux spécifications YS. Pour contrer ce phénomène, un traitement thermique de « détensionnement » activant la restauration statique et la relaxation est appliqué sur la zone déformée uniquement, pour ramener la martensite à un état dont les propriétés mécaniques sont, à une tolérance près, celles de l'état avant déformation plastique, assurant ainsi l'homogénéité des propriétés mécaniques sur l'ensemble du tube.

On joue pour ce faire sur la température et le temps de ce traitement thermique. Les conditions optimales dépendent a priori de la nuance d'acier utilisée. C'est pour les déterminer que cette étude joint l'expérience (traitements thermiques et essais mécaniques, observations et analyses microstructurales) à l'identification de modèles complexes de plasticité (écrouissage cinématique, voire écrouissage de distorsion) pour décrire l'évolution des propriétés mécaniques tant lors de la déformation que lors du recuit.

Ainsi identifiés, les modèles d'écrouissage lors de la déformation de la martensite, de restauration et de relaxation seront implémentés dans le logiciel éléments finis Forge NxT, développé par le CEMEF et Transvalor [6].

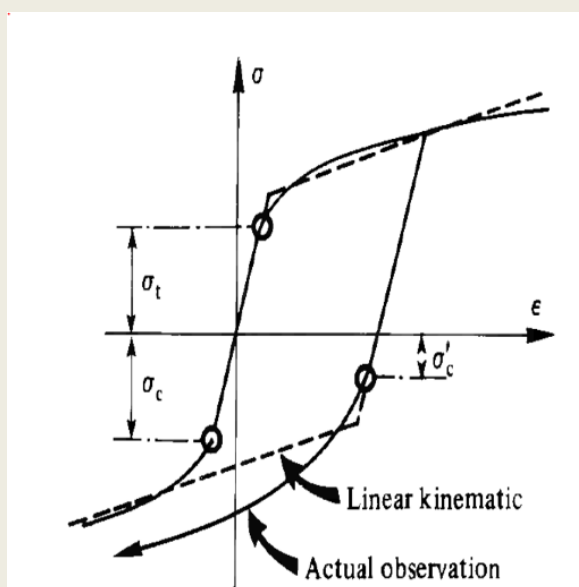


Figure 3 : L'effet Bauschinger [4]

L'objectif principal des travaux est donc de prévoir de manière précise et efficace le retour aux propriétés mécaniques d'avant déformation à froid, en fonction de la température et du temps de recuit. Les points saillants des travaux seront donc :

- une bibliographie sur la métallurgie physique de ces aciers à haute résistance, les propriétés de la martensite, ainsi que différents modèles avancés d'écrouissage lors de la déformation à froid [1,2] ;
- des essais de traitement thermique et des essais mécaniques en conditions de

	laboratoire bien contrôlées, selon un plan d'expérience couvrant les conditions industrielles pour au moins deux nuances d'acier et deux niveaux de pré-déformation (ainsi qu'en expansion ou en contraction) afin de s'assurer de la généralité des modèles développés ; • la mise au point d'une méthodologie d'identification des paramètres des lois de comportement, débouchant sur le choix d'un modèle et l'écriture des lois correspondantes, • l'analyse microstructurale des mécanismes thermiquement active lors des traitement thermiques • le choix d'un modèle de restauration statique et le développement d'une méthodologie d'identification de paramètres • l'implémentation de ces modèles dans Forge[®] sous forme de loi de comportement utilisateur ; • l'application à une campagne de validation expérimentale sur tubes réels.
Références	[1] Vicente Alvarez, M.A, Marchena, M., Perez, T. (2008). Recovery Kinetics of Cold-Deformed Cr-Mo Steels, Metall. Mater. Trans. A 39 (13) 3283–3290. DOI : 10.1007/s11661-008-9655-6 [2] Vicente-Alvarez, M.A., Bergant, M., Perez, T. (2010). Relaxation of the Bauschinger effect by thermal treatment on tempered martensitic steels, Materials Science and Engineering: A, 527, 5939–5946. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.010. [3] Barlat, F., Yoon, S.Y., Lee, S.Y., Wi, M.S., Kim, J.H. (2020). Distortional plasticity framework with application to advanced high strength steel, International Journal of Solids and Structures, 202, 947-962, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.05.014. [4] Lemaitre, J., Chaboche, J.-L.. (1994). Mechanics of solid materials (Cambridge University Press) [5] Kolpak, F., Hering, O., Tekkaya, A.E. (2021). Consequences of large strain anisotropic work-hardening in cold forging, International Journal of Material Forming 14, 1463-1481. DOI: 10.1007/s12289-021-01641-9 [6] https://www.transvalor.com/fr/forge
Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant	Rédaction d'articles Présentation dans des conférences internationales Le cas échéant, protection au titre de la Propriété Industrielle
Outils	Programmation (Fortran, Python). Essais mécaniques et corrélation d'images

Mots-clé	Modélisation numérique, Martensite, effet Bauschinger
Type projet/ collaboration	La thèse (CIFRE) est cofinancée par VALLOUREC. https://www.vallourec.com/
Profil & compétences	• Mécanique, Modélisation numérique. • Motivation tant pour le numérique que pour l'expérience. • Rigueur et capacité à s'investir pleinement dans un sujet. • Aptitude au travail en équipe. • Maîtrise de la langue anglaise (niveau B2 minimum).
Lieux	- MINES Paris, CEMEF, Sophia Antipolis (80%) - Vallourec Centre de Recherche, Aulnoye-Aymeries (20%)
Equipe(s) de recherche	CSM (Computational Solid Mechanics) MSR (Métallurgie, Structures et Rhéologie) S&P (Surfaces & Polymères)
Encadrant / Dir. de thèse	Katia Mocellin, Directrice de Recherches Mines Paris (HDR) katia.mocellin@minesparis.psl.eu , +33 (0)4 93 95 74 32 Charbel Moussa, Chargé de Recherches Mines Paris (HDR) Charbel.moussa@minesparis.psl.eu , +33 (0)4 93 95 74 33 Pierre Montmitonnet, Directeur de Recherches CNRS (HDR) Pierre.montmitonnet@minesparis.psl.eu , +33 (0)4 93 95 74 14
Tuteur(s) entreprise	Meriane Fernandès, Ingénieure de Recherche, Vallourec meriane.fernandes@vallourec.com Hédi Nouri, Ingénieur de Recherche & Développement (HDR), Vallourec hedi.nouri@vallourec.com

Pour postuler : vous pouvez remplir le formulaire en ligne :
<https://applyfor.cemef.mines-paristech.fr/phd/>