



HAL
open science

Caractérisation mécanique d'un revêtement dur et identification d'une loi de comportement à haute température

Gauthier Beaurin, Daniel Nélias, Michel Coret, Jean-Philippe Mathieu

► To cite this version:

Gauthier Beaurin, Daniel Nélias, Michel Coret, Jean-Philippe Mathieu. Caractérisation mécanique d'un revêtement dur et identification d'une loi de comportement à haute température. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03420939

HAL Id: hal-03420939

<https://hal.science/hal-03420939>

Submitted on 9 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation mécanique d'un revêtement dur et identification d'une loi de comportement à haute température

G. BEAURIN^{a,b}, D. NELIAS^b, M. CORET^b, J.P. MATHIEU^a

a. EDF R&D - Matériaux et Mécanique des Composants- 77818 MORET-SUR-LOING

b. INSA-Lyon - LaMCoS - CNRS UMR 5259 - F-69621 VILLEURBANNE

Résumé :

L'intégrité des portées d'étanchéité des robinets des centrales REP nécessite l'emploi de revêtements durs (Norem, base Fe) déposés par soudage PTA (plasma transferred arc). On en propose ici une caractérisation mécanique de l'ambiante aux hautes températures. En s'appuyant sur des essais jusqu'à 1000 °C de dilatométrie libre, de traction isotherme et de traction-compression, on détermine l'évolution des caractéristiques thermomécaniques en fonction de la température et une loi de comportement élasto-plastique pour la simulation numérique du soudage (SNS). Le caractère prédictif du modèle développé est enfin validé par des essais de soudage PTA.

Abstract :

PTA-welding deposited hardfacing alloys (Norem, Fe-based), are required to ensure integrity of sealing parts in PWR reactors. A mechanical characterization is proposed here from ambient to high temperature. By carrying dilatometry, isothermal tension, and tension-compression tests until 1000 °C, one determines the evolution of thermomechanical characteristics according to the temperature and an elasto-plastic behavior law useful for numerical simulation of the welding process. Predictive capabilities of the model is confirmed by PTA-welding tests.

Mots clefs : soudage ; haute température ; microstructure

1 Introduction

Les surfaces d'étanchéité des matériels de robinetterie dans les circuits primaires des centrales REP doivent supporter des chargements nominaux élevés (pression de fermeture, frottements) et résister à l'effet des chargements transitoires (chocs thermiques). L'intégrité des portées d'étanchéité des robinets nécessite donc l'emploi de revêtements durs déposés par soudage. Historiquement utilisés pour assurer cette fonction du fait de leur excellente résistance à l'usure, à la corrosion et de leurs bonnes propriétés mécaniques, les Stellites (base Co) posent un problème de contamination radiologique des circuits par relâchement puis accumulation de Co activé. Un des matériaux envisagés pour remplacer les bases Co est le Norem (base Fe). Il fait l'objet d'études visant à comprendre les chargements mécaniques résiduels induits par les procédés de dépôt (SNS), ainsi que leurs conséquences métallurgiques.

Dans l'optique de prédire le comportement et prévenir la ruine des structures soudées, il est nécessaire de connaître l'état mécanique initial des matériaux et notamment le niveau d'écrouissage local et les contraintes résiduelles induits par le mode de fabrication. Pour cette raison, on cherche à modéliser le dépôt du Norem02 par soudage PTA (Plasma-Transferred-Arc).

En vue de la SNS, il est donc nécessaire de connaître le comportement mécanique global du matériau sur toute la gamme de température intervenant dans le procédé. Face au manque de données concernant le comportement mécanique du Norem02, l'objectif de cette étude est la caractérisation expérimentale et la modélisation de son comportement mécanique.

Une caractérisation du comportement du Norem02 de la température ambiante aux hautes températures est proposée et une loi de comportement élastoplastique avec écrouissage est identifiée pour la simulation numérique du soudage. La détermination de l'évolution des caractéristiques thermomécaniques en fonction de la température et du modèle de comportement du matériau s'appuie sur des essais de dilatométrie libre depuis l'ambiante jusqu'à 1000 °C et de traction isotherme à des températures variant de l'ambiante à 1000 °C à plusieurs vitesses de déformation.

Le choix du type d'écrouissage, isotrope ou cinématique, est en général critique car le soudage implique des cycles de traction et de compression du fait des cycles thermiques successifs subis par la couche de matériau déposée. Il est effectué en s'appuyant sur des essais de traction-compression isotherme entre 20 °C et 400 °C. Les essais cycliques et de traction à différentes vitesses montrent une faible dépendance du comportement mécanique à la vitesse de déformation. On peut donc s'affranchir d'un terme décrivant les effets visqueux.

Afin de valider la démarche, des essais de soudage PTA sont réalisés sur des maquettes représentatives de la géométrie réelle du robinet pour tester le caractère prédictif du modèle développé. La confrontation des résultats issus du calcul et de ceux issus de l'expérimentation nécessite le développement dans Code_Aster d'un modèle de simulation du soudage PTA.

2 Essais mécaniques

L'identification des lois de comportement des matériaux constituant un composant est une étape essentielle dans la compréhension et l'anticipation du comportement des structures. Dans le cadre de ce travail, cette identification est réalisée à partir d'essais mécaniques sur des échantillons représentatifs du matériau (volume élémentaire représentatif).

Les échantillons de Norem sont déposés par soudage plasma à arc transféré (PTAW) sur des substrats en acier 316L (figure 1). Des éprouvettes d'essais cylindriques sont ensuite prélevées par électro-érosion dans la masse du revêtement selon les géométries présentées figure 2.



FIGURE 1 – Dépôt multipasses par soudage PTA de Norem02 sur substrat inox 316L

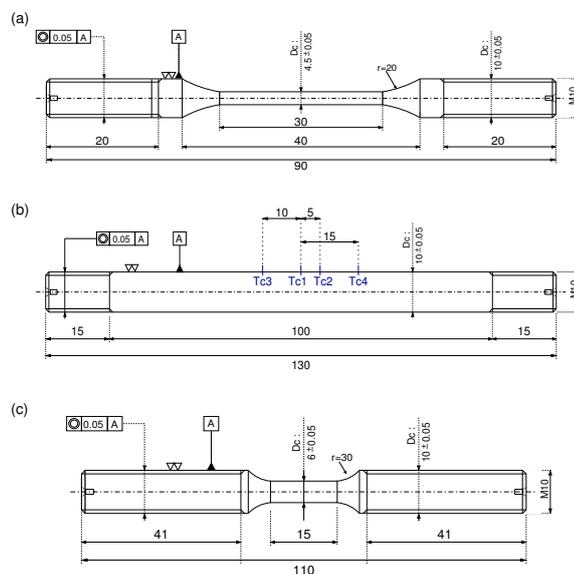


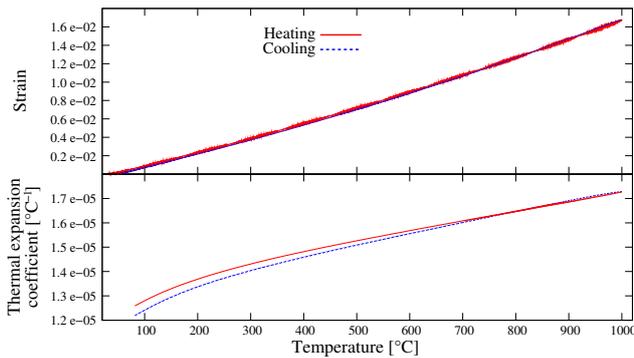
FIGURE 2 – Géométrie d'éprouvettes pour essais de : (a) : traction à basse température (<600 °C), (b) : traction à haute température (≥600 °C), et (c) : traction-compression

Une campagne d'essais mécaniques a été effectuée sur un dispositif Gleeble : ce simulateur de procédés physiques permet de réaliser des essais dynamiques sur une très large gamme de paramètres thermo-mécaniques. Le suivi continu de la température par quatre thermocouples soudés dans la zone utile des échantillons lors des essais dynamiques à chaud permet une maîtrise totale de l'hétérogénéité thermique due au chauffage par induction. Ainsi, les gradients thermiques maximaux relevés lors des essais de traction à très haute température n'excèdent pas 5°C.mm⁻¹. Ceux-ci sont très sensibles aux matériaux

et aux géométries employés pour concevoir les mors du dispositif de chauffe (et qui constituent la partie conductrice), ainsi qu'à la géométrie des éprouvettes. Dans tout ce travail, nous considérerons que la température est homogène dans la partie utile des éprouvettes où la déformation est mesurée.

Trois types de sollicitations ont été étudiées : traction simple, dilatométrie libre et traction-compression. Les paramètres dominants ont été identifiés en faisant varier les vitesses de chauffe et de refroidissement en dilatométrie libre, ainsi que la température (isotherme) d'essai et les vitesses de déformation lors des sollicitations en traction et traction-compression.

La figure 3 présente les résultats de l'essai de dilatométrie libre de la température ambiante jusqu'à 1000°C. La vitesse de montée en température est fixée à 20°C.s⁻¹, le refroidissement libre est assuré par une circulation d'air dans l'enceinte thermique et par les mors continuellement refroidis.



Température [°C]	α [$\times 10^{-4}$ °C ⁻¹]		E [GPa]	σ_y [MPa]	$\sigma_{rupture}$ [MPa]
	Chauffage	Refroidissement			
20	-	-	187	621	867
100	12,7	12,4	176	-	-
200	13,7	13,4	170	48	699
400	15,8	14,6	168	421	675
600	15,7	15,6	151	384	589
700	16,0	16,0	107	268	372
800	16,5	16,5	94	195	230
900	16,8	16,9	70	41	59
1000	17,3	17,3	59	31	48

Essai de dilatométrie libre

Identification de α , E et σ_y

FIGURE 3 – (Gauche) Déformation et coefficient de dilatation thermique dans le sens longitudinal lors du chauffage et du refroidissement. (Droite) Identification des paramètres α , E et σ_y .

La figure 4 présente les résultats d'essais de traction monotone à vitesse de déformation constante $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ s⁻¹ de 20°C à 1000°C. Les essais sont réalisés après uniformisation de la température dans la zone utile de l'éprouvette. Une très faible ductilité est observée de l'ambiante à 600°C.

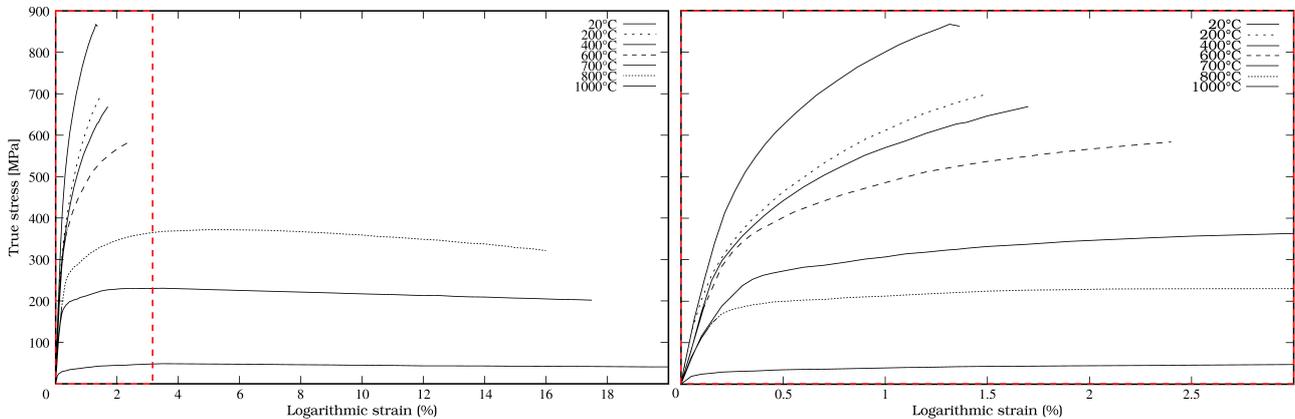
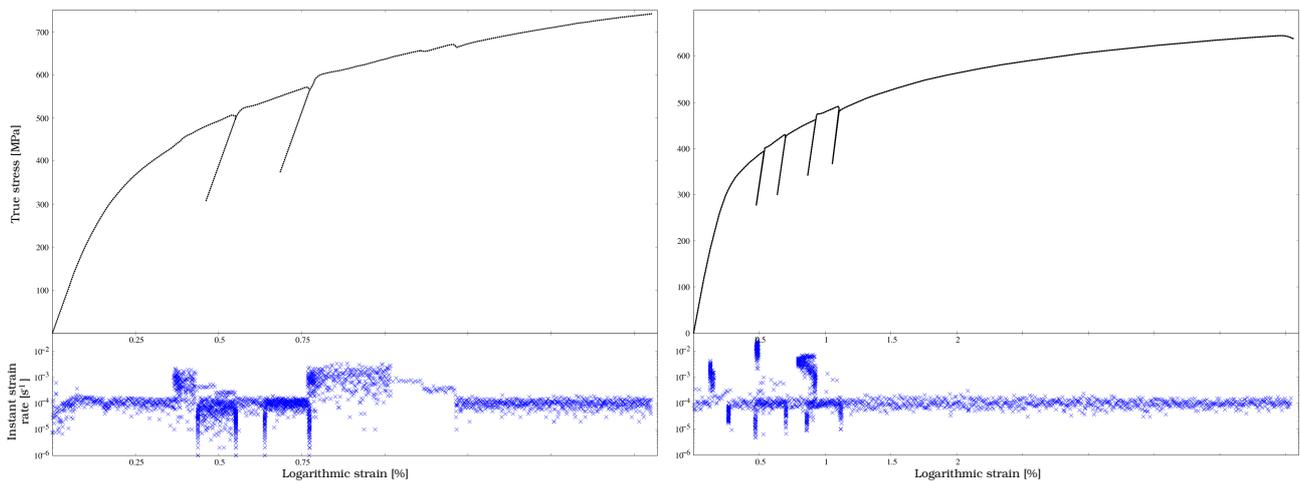


FIGURE 4 – Courbes contrainte vraie - déformation logarithmique, échelle pleine (gauche) - tronquée (droite)

Des essais de traction à vitesse de déformation non uniforme sont réalisés dans le but d'évaluer l'importance des effets visqueux. La figure 5 présente des courbes de traction obtenues en faisant varier la vitesse de déformation au cours d'un même essai, dans les parties élastiques et plastiques. La partie inférieure de chaque graphique représente la distribution des vitesses instantanées de déformation mesurées au cours des essais. L'augmentation de la vitesse de déformation de 10⁻⁴s⁻¹ à 10⁻³s⁻¹ puis à 10⁻²s⁻¹ crée un palier sur la courbe contrainte-déformation, amplifié à haute température, indiquant un accroissement des effets visqueux. Toutefois, leur importance est suffisamment minime dans la zone d'intérêt du soudage (basse et moyenne température) pour nous permettre de les négliger dans l'établissement d'une loi de comportement.

FIGURE 5 – Courbes de traction à $\dot{\epsilon}$ variable à 200°C (à gauche) et 600°C (à droite)

Les figures 6 et 7 présentent les résultats des essais de traction-compression à vitesse de déformation constante $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{s}^{-1}$. Comme pour les essais de traction simple, les chargements mécaniques débutent à l'issue d'une phase de stabilisation de la température prescrite dans la zone utile des éprouvettes.

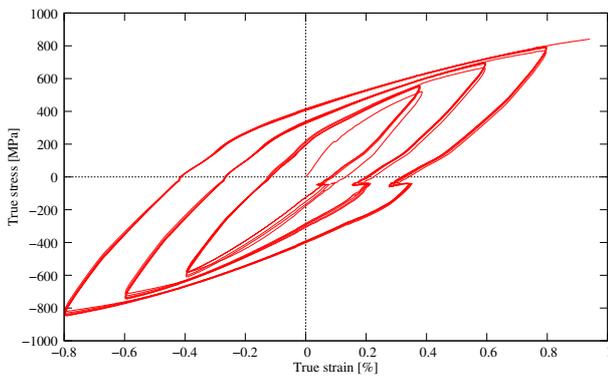


FIGURE 6 – Courbe contrainte vraie - déformation logarithmique pour des essais à 20°C comprenant 5 cycles de traction-compression par taux de déformation.

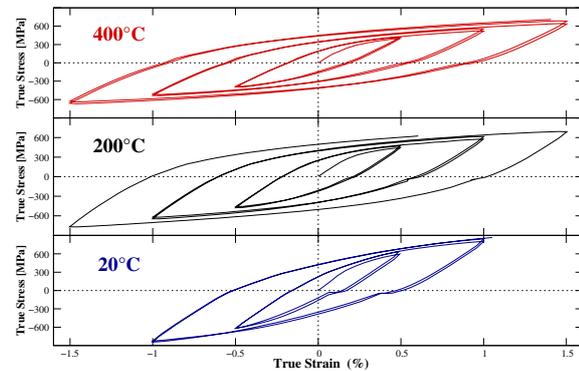


FIGURE 7 – Courbes contrainte vraie - déformation logarithmique pour des essais à 20°C, 200°C, et 400°C comprenant 2 cycles de traction-compression par taux de déformation.

Une non-linéarité est observable pour chaque cycle de chaque essai, à l'instant où la contrainte change de signe. Cette non-linéarité a tendance à s'estomper lorsque la température augmente, puisqu'elle est davantage présente à 20°C. L'explication de ce phénomène est la présence d'un jeu au niveau de l'encastrement entre l'éprouvette et le mors, malgré le serrage important effectué en début d'essai. À haute température, l'éprouvette se dilate plus que le mors continuellement refroidi, donc le jeu diminue.

3 Identification d'un modèle de comportement

L'identification des lois de comportement impose de choisir un modèle de comportement susceptible de décrire fidèlement le comportement du matériau, pour ensuite recalculer les paramètres du modèle par rapport aux données expérimentales. L'identification est donc réalisée par la résolution d'un problème inverse. Les variables du modèle n'étant pas observables directement à partir des relevés expérimentaux, on a recours à la modélisation du système pour identifier les paramètres de la loi.

Le module d'Young (E) et la limite d'élasticité (σ_y) sont déterminés en fonction de la température à partir des courbes de traction. Sur la même plage de température [20°C - 1000°C], le coefficient de dilatation (α) est déduit de l'essai de dilatométrie libre. Ces paramètres sont donnés dans le tableau 3.

La loi développée ici ne vise pas à reproduire le durcissement initial suivi de l'adoucissement mais à

bien reproduire la forme des boucles contraintes-déformations, essentielle à l'application des critères de fatigue énergétique.

L'érouissage isotrope, qui se traduit par une transformation homothétique du domaine élastique dans l'espace des contraintes, est modélisé par une loi de type Ramberg-Osgood. Dans le cas isotherme, cette loi est décrite par l'équation :

$$\sigma_y = \sigma_{y_0} + Kp^N$$

avec σ_{y_0} la limite d'élasticité initiale, K le coefficient de résistance plastique, p la déformation plastique équivalente et N l'exposant d'érouissage. Les paramètres de la loi, identifiés à partir des cycles stabilisés, sont présentés dans le tableau 1.

L'érouissage cinématique, qui se traduit par une translation du domaine élastique dans l'espace des contraintes, est modélisé par une loi non-linéaire d'Armstrong-Frederick saturante (loi de type Chaboche. Dans le cas isotherme, cette loi est décrite par l'équation :

$$\dot{X} = \frac{2}{3}C\dot{\varepsilon}^p - \gamma X\dot{p}$$

L'évolution de l'érouissage s'écrit pour un essai de traction uniaxial :

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{\dot{\sigma}}{H} = \frac{d\sigma}{C - \gamma(p) X(p) \operatorname{sgn}(\sigma - X)}$$

Les paramètres de la loi, identifiés à partir des cycles stabilisés, sont présentés dans le tableau 1.

Température [°C]	E [MPa]	σ_y [MPa]	¹ Ramberg-Osgood			² Armstrong-Frederick		
			σ_{y_0} [MPa]	K [MPa]	N	C1 [MPa]	C2 [MPa]	γ_2
20	180289	551,7	537,4	4357,8	0,557	7783,7	63512,3	239,1
100	174391	402,8	354,1	1588,3	0,331	3007,0	70367,8	211,6
200	168514	353,9	330,4	1569,6	0,342	2011,7	55771,4	162,5
300	158698	295,2	257,5	1384,4	0,303	5497,9	11437,9	424,1
400	152047	288,9	259,2	1289,3	0,296	3480,6	86487,0	279,4
700	107200	268,0	267,2	423,5	0,409	373,2	11709,2	130,3
900	68161	40,9	36,4	174,7	0,209	331,8	26273,7	402,2
1000	54151	30,3	29,4	52,1	0,142	87,0	402,2	1484,9

TABLE 1 – Identification des paramètres de lois de type ¹Ramberg-Osgood et ²Armstrong-Frederick

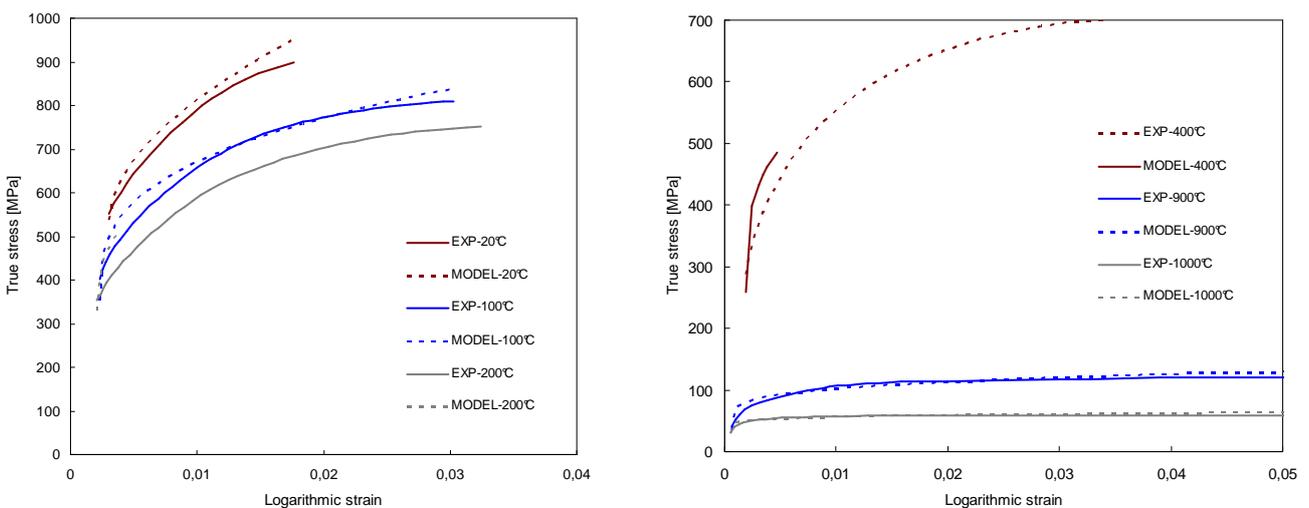


FIGURE 8 – Courbes de traction de 20 à 1000°C. Comparaison expérience-modèle de Ramberg-Osgood.

Ces deux lois ne décrivant pas de manière fidèle le comportement du Norem (la figure 8 représente la comparaison des courbes de traction expérimentales et de celles obtenues dans le cas du modèle de

Ramsberg-Osgood), il est nécessaire de définir une loi d'écroissage mixte de type Chaboche, présentant à la fois un écroissage isotrope et un écroissage cinématique non-linéaire.

Les courbes de traction et de traction-compression pour un tel modèle sont présentées figure 9.

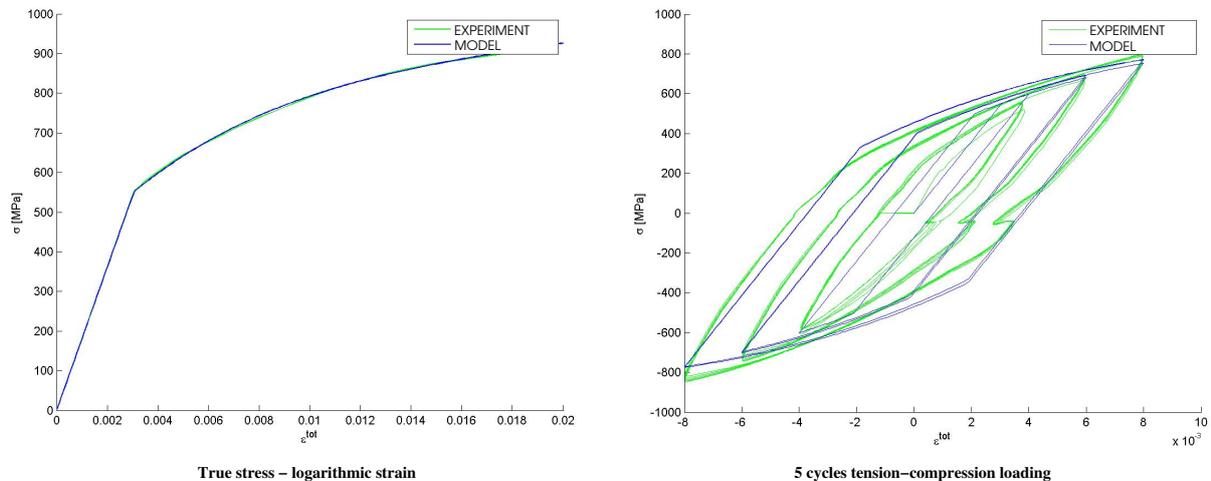


FIGURE 9 – Courbes de traction et de traction-compression à 20°C. Comparaison expérience-modèle.

Le comportement en traction monotome est fidèlement reproduit, puisque sur toute la gamme de température d'essais l'erreur ne dépasse pas 1%. En revanche, l'erreur produite sur la forme des boucles de chargement cyclique est encore assez importante, puisqu'elle atteint 6% en contrainte (à 20°C) pour les taux de déformations les plus élevés. Ceci est vraisemblablement dû au fait que le modèle utilisé ne prend en compte que le taux de déformation plastique cumulée et non l'endommagement par fluage.

4 Conclusion

La loi de comportement proposée permet une première approche du comportement mécanique du Norem. Le comportement en traction uniaxiale est très proche du comportement réel, et ce sur toute la plage de température du procédé. Lors de chargements alternés en traction-compression, le modèle s'en éloigne davantage. À une température donnée, la déformation totale à la rupture est maximale dans le cas d'essais de traction monotome. Par ailleurs, plus le nombre de cycles de chargement en traction-compression est important, plus la rupture survient pour un taux de déformation totale cumulée faible. Il en résulte donc que l'endommagement joue un rôle important dans la rupture des échantillons, puisqu'il dépend à la fois du taux de déformation plastique cumulée et du nombre de cycles de traction-compression. Afin de comprendre l'évolution de la microstructure du matériau au fur et à mesure des chargements subis, des essais de flexion sous microscope électronique à balayage seront entrepris.

Enfin, les modèles de comportement présentés ici feront l'objet d'une validation lors de calculs de soudage sous Code_Aster après identification d'une loi viscoélastoplastique de Chaboche.

Références

- [1] AFNOR 1992 Norme européenne - Essais de traction à température élevée *NF EN 10002-5*
- [2] A. Ambroziak, P. Klosowski 2006 The elasto-viscoplastic Chaboche model. *Task Quarterly 10 n.1*
- [3] G. Beaurin, J.P. Mathieu, D. Nelias, M. Coret 2011 Microstructural and mechanical properties evolutions of plasma transferred arc deposited Norem02 hardfacing alloy at high temperature. *Materials Science & Engineering A 528*, pp. 5096-5105
- [4] F. Curtit 2006 Identification d'une loi de comportement de type Chaboche avec effet de mémoire d'écroissage pour l'acier 304L à 20°C et 300°C. *Technical Report H-T26-2007-03264-FR*, EDF R&D, Département Matériaux et Mécanique des Composants
- [5] J.L. Chaboche 1993 Cyclic viscoplastic constitutive equations *Journal of Applied Mechanics - Vol. 60* - pp. 813s-828s