CSMA 2017
13ème Colloque National en Calcul des Structures
15-19 Mai 2017, Presqu'île de Giens (Var)

Méthode simplifiée pour la restauration d'écrouissage utilisée dans la simulation numérique du soudage

S. Hendili[1], L. Le Gratiet[1], M. Abbas[1,2], E. Lorentz[1,2]

[1] *EDF R&D, {sofiane.hendili,loic.le-gratiet}@edf.fr*
[2] *IMSIA, UMR 9219 EDF-CNRS-CEA-ENSTA, Université Paris Saclay, {mickael.abbas,eric.lorentz}@edf.fr*

Résumé — On décrit un modèle simplifié de restauration d'écrouissage utilisé dans la simulation numérique du soudage (SNS). Ce modèle, écrit sous forme d'équation différentielle, permet de prendre en compte l'effet de restauration des propriétés plastiques de l'acier lors de la simulation du soudage multi-passes. Les paramètres de ce modèle sont déterminés par recalage à partir d'essais expérimentaux développés et réalisés par l'EPRI. L'étape de validation du modèle, au cours de laquelle les résultats numériques sont confrontés à des résultats expérimentaux, est réalisée en deux temps : d'abord en simulant les essais EPRI puis en simulant des essais Satoh.
Mots clés — simulation, soudage, écrouissage.

1 Introduction

Lors du soudage, les incompatibilités locales de déformations, sous l'effet des gradients thermiques, entraînent une plastification des matériaux dans la zone soudée qui est à l'origine de la formation de contraintes résiduelles. Cette plastification s'accompagne d'un écrouissage plus ou moins prononcé. Cette augmentation de l'écrouissage du matériau en cours de soudage, sous l'effet de la plasticité, est cependant compensée par deux phénomènes.

— D'une part, le phénomène de fusion/solidification, qui efface l'histoire thermomécanique subie par le matériau avant fusion (et donc supprime son état d'écrouissage préalable).
— D'autre part, les phénomènes de diffusion dans la matrice solide, et de recristallisation, qui conduisent à une diminution de l'écrouissage du matériau en fonction du temps et de la température. Ces phénomènes entraînent l'annihilation des dislocations, ce qui se traduit par une diminution de la limite d'élasticité effective de l'acier ou de l'alliage au cours du temps à une température donnée, et donc à une disparition partielle ou totale de l'écrouissage.

Par la suite, on qualifiera de *restauration d'écrouissage* la disparition, partielle ou totale, de l'état d'écrouissage du matériau sous l'effet des phénomènes thermo-métallurgiques intervenant lors du soudage .

2 Modèle physique

2.1 Modèle dynamique d'écrouissage

Pour la définition du modèle physique d'écrouissage, nous introduisons les notations suivantes.

— $\dot{p} = \frac{dp}{dt}$ correspond à la création de déformation plastique hors restauration d'écrouissage. Cette quantité est déterminée par un état de contrainte, une sollicitation et une loi de comportement.
— $r(t)$ représente la déformation plastique à l'instant t.
— r_∞ est la quantité de déformation plastique qui ne peut pas être restaurée.

Dans le modèle physique proposé, la partie restauration d'écrouissage est séparée de celle de création de déformation plastique. La dynamique d'écrouissage a la forme suivante :

$$\dot{r} = \dot{p} - k\langle r(t) - r_\infty \rangle, \tag{1}$$

où $\langle x \rangle = \max(x, 0)$ désigne la partie positive de x. Il y a donc restauration d'écrouissage seulement pour le cas où la déformation plastique est supérieure à r_∞ qui correspond à la quantité de déformation plastique ne pouvant pas être restaurée. Cette quantité dépend de la température T.

2.2 Contrôle de la vitesse d'écrouissage

La vitesse de restauration est contrôlée par le paramètre k qui dépend également de la température T. Lorsque T est proche de la température de début d'écrouissage T_1, k doit être proche de zéro. Au contraire, lorsque T est proche de la température de restauration totale T_2, k doit être très élevé. Le coefficient k doit être également croissant en fonction de la température (c.-à-d., plus celle-ci augmente, plus la restauration est rapide) et il doit satisfaire les deux relations suivantes :

$$\begin{aligned} k(T) &= 0 \quad \text{pour} \quad T \leq T_1 \\ \lim_{T \to T_2} k(T) &= +\infty. \end{aligned}$$

La première relation se comprend aisément, elle signifie que la restauration est nulle pour $T \leq T_1$. La deuxième relation implique que la restauration d'écrouissage est totale pour $T = T_2$. Plusieurs choix de k en fonction de T sont possibles. Parmi ceux testés, nous avons conservé le suivant :

$$k(T) = \begin{cases} e^{-\alpha \frac{T_1 - T}{T_2 - T}} - 1 & T \in [T_1, T_2[\\ 0 & T \leq T_1 \end{cases} \tag{2}$$

2.3 Comportement asymptotique

Le modèle présenté précédemment implique que la restauration d'écrouissage ne peut pas être complète. En effet, elle a une asymptote qui est donnée par r_∞. D'après [1], la valeur de cette asymptote dépend à la fois de la température et de la quantité de déformation plastique. Néanmoins, nous effectuons une simplification pour notre modèle en considérant que r_∞ est fonction de la température et de la quantité de déformation plastique en début d'écrouissage. De plus, nous lui donnons la forme particulière suivante :

$$r_\infty(T, r_0) = \tau_\infty(T) r_0,$$

où r_0 est la déformation plastique en début de restauration. Les hypothèses induites par cette relation sont :

- Le comportement asymptotique de la restauration est linéaire en fonction de la déformation plastique de début d'écrouissage.
- Le comportement asymptotique de la restauration ne dépend pas des variations de plasticité entre le début et la fin de la restauration.

En pratique, la fonction $\tau_\infty(T)$ sera estimée grâce aux essais expérimentaux EPRI. Ce choix de modélisation est en fait contraint par les données que nous disposons. En effet, à partir des essais présentés en Section 4, il est impossible d'apprendre la relation entre r_∞, T et la quantité de déformation plastique. En revanche, le fait d'imposer la relation $r_\infty(T, r_0) = \tau_\infty(T) r_0$ nous permet de caler $\tau_\infty(T)$ et d'utiliser ce modèle dans un autre cadre que les essais EPRI.

3 Implémentation du modèle de restauration d'écrouissage dans code_aster

Nous présentons dans cette section les développements réalisés pour la mise en œuvre dans code_aster (voir [6])du modèle présenté dans la section 2. L'équation (1) qui modélise la dynamique de restauration d'écrouissage peut être prise en compte en post-traitement du calcul, à la fin de chaque pas de temps.

3.1 Algorithme

La méthode consiste à modifier la valeur de la variable d'écrouissage isotrope à la fin de chaque pas de temps convergé de l'algorithme de résolution non-linéaire. Les principales actions de développement concernent :

- la modification du post-traitement appliqué aux variables d'écrouissage ;
- l'ajout d'une nouvelle variable interne ;

— la modification des variables d'entrée.

La prise en compte du modèle de restauration a été programmée en modifiant, à la fin de chaque pas de temps, la variable d'écrouissage $r|_{t+\Delta t}$. La valeur de la variable d'écrouissage après restauration, notée $\tilde{r}|_{t+\Delta t}$, est calculée de la manière suivante :

— si $T < T_1$ alors :

$$\tilde{r}|_{t+\Delta t} = r|_{t+\Delta t} \tag{3}$$

— sinon, si $(1-\varepsilon)T > T_2$ alors :

$$\tilde{r}|_{t+\Delta t} = 0 \tag{4}$$

— sinon :

— si $(r|_{t+\Delta t} > r_\infty|_{t+\Delta t})$ alors :

$$\tilde{r}|_{t+\Delta t} = \frac{r|_{t+\Delta t} + k.\Delta t.r_\infty|_{t+\Delta t}}{1+k\Delta t} \tag{5}$$

— sinon :

$$\tilde{r}|_{t+\Delta t} = r|_{t+\Delta t} \tag{6}$$

avec

$$\begin{aligned} k = k(T) &= e^{-\alpha(T)\frac{T_1-T}{T_2-T}-1} \\ r_\infty = r_\infty(T) &= r_0\tau_\infty(T) \end{aligned} \tag{7}$$

où r_0 est la valeur de r au début de la phase de restauration d'écrouissage.

3.2 Nouvelle variable interne

Les coefficients du modèle T_1, T_2, $\alpha(T)$ et τ_∞ seront renseignés par l'utilisateur dans la liste des paramètres matériaux. La détermination des ces coefficients est réalisée par calage à partir des résultats expérimentaux de l'EPRI.

Les essais expérimentaux de l'EPRI ont mis en évidence une saturation du taux de restauration à partir d'une certaine durée de maintien de la température lors du cycle thermique. Ce phénomène est pris en compte par le modèle proposé. Il se traduit par un comportement asymptotique de la variable d'écrouissage pour des temps de maintien élevés. Plus précisément, le terme $< r - r_\infty >_+$ est nul si $r < r_\infty$.

La difficulté d'un point de vue de l'implémentation provient du faite que la valeur asymptotique r_∞ dépend du niveau d'écrouissage au début de la phase de restauration. Cet écrouissage initial n'est pas une donnée d'entrée du modèle. Il doit être évalué en cours de calcul.

Dans un premier temps, nous supposons la relation linéaire suivante entre r_∞ et r_0 :

$$r_\infty = \tau_\infty r_0 \tag{8}$$

où τ_∞ est un paramètre qui dépend de la température et qui caractérise le taux de restauration maximal de l'écrouissage, à une température donnée. Ce paramètre est une des données d'entrée du modèle qui peut être déterminé par calage à partir des essais expérimentaux de l'EPRI.

Néanmoins, pour calculer r_∞, il faut pouvoir accéder à la valeur de l'écrouissage r_0 au début de la phase de restauration. Pour cela il est nécessaire d'introduire une nouvelle variable interne qu'on notera V_{r_0} pour la suite de ce document.

4 Simulation des essais EPRI

L'objectif de la simulation des essais EPRI est de caler les paramètres du modèle de restauration en ajustant les valeurs numériques du taux de restauration par rapport aux valeurs expérimentales. Par la suite, on présente les différents choix de modélisation qui ont été faits pour la mise en œuvre de la simulation des essais EPRI en respectant les étapes principales du protocole expérimental. On notera que la simulation de l'essai réalisé sur l'éprouvette B suffit à calculer la valeur du coefficient R. On rappelle que, pour l'éprouvette B, le programme expérimental se décompose en quatre phases de chargement, les deux premières phases et la quatrième phase sont réalisées à température ambiante :

— phase B_1 : traction uniaxiale jusqu'à une déformation totale $\varepsilon^{tot,1} = 20\%$;
— phase B_2 : retour élastique jusqu'à un état de contrainte nul ;
— phase B_3 : traitement thermique :
  — phase $B_{3.1}$: chauffage jusqu'à une température $T = T^{max}$,
  — phase $B_{3.2}$: maintien de la température à $T = T^{max}$ pendant t^m secondes,
  — phase $B_{3.3}$: refroidissement jusqu'à la température ambiante ($T = 20^oC$).
— phase B_4 : traction uniaxiale jusqu'à une déformation totale $\varepsilon^{tot,2} = 60\%$.

4.1 Choix de modélisation

— Le maillage est constitué d'un seul élément hexaédrique unitaire à huit nœuds pour modéliser la zone utile (zone centrale) de l'éprouvette.
— Le chargement mécanique est imposé sur une face de l'élément (déplacement imposé pour les phases de traction et bord libre pour les autres phases) et un chargement thermique $T^{imp}(t)$ est imposé sur tout les nœuds du maillage.
— Les conditions aux limites sont choisies pour obtenir un état de contrainte en traction uni-axiale.
— Pour les instants de calcul, on identifie les instants particuliers du protocole expérimental :

Instants	Valeurs	Commentaire
t_0	0.0	Début de l'essai
t_1^*	1.0	Fin de la première phase de traction
t_2^*	2.0	Fin du cycle de décharge (Retour élastique)
$t_3 = t_3(T^{max})$	$t_3 = t_2 + \frac{T^{max} - T^{amb}}{\dot{T}^{chauffage}}$	Fin du cycle de chauffage
$t_4 = t_4(T^{max}, t^m)$	$t_4 = t_3 + t^m$	Fin de la phase de maintien à la température T^{max}
$t_5 = t_5(T^{max})$	$t_5 = t_4 + \frac{T^{amb} - T^{max}}{\dot{T}^{refroidissement}}$	Fin du cycle de refroidissement
t_6	$t_6 = 2 \times t_5$	Fin de la deuxième phase de traction

4.2 Validation

Les développements sont validés en simulant l'essai EPRI, avec une loi de comportement élasto-plastique à écrouissage isotrope linéaire, et pour différentes valeurs de la température T^{max} et de la durée de maintien t^m. Le taux de restauration R^{num}, obtenu en post-traitant les résultats des calculs avec code_aster, a été calculé, toujours avec les paramètres du modèle de restauration d'écrouissage obtenus lors d'un calage simple basé sur l'équation 1 lorsque $\dot{p} = 0$ (c'est-à-dire sans simulation). Les résultats sont satisfaisants d'autant que, dans cette comparaison, on suppose que la restauration d'écrouissage est négligeable lors du chauffage et du refroidissement.

5 Calage du modèle de restauration d'écrouissage

Pour cette phase de calage sur les essais EPRI, nous considérons la simulation présentée en Section 4.2. Les montées et descentes de températures lors des essais sont donc prises en compte ainsi que les cycles de traction et de décharge. De plus, une loi de comportement élasto-plastique à écrouissage isotrope linéaire est utilisée. Le calage est effectué à la fois sur le paramètre α et τ_∞ dépendant tous les deux de la température. Nous nous concentrons dans cette section sur la quantification des incertitudes sur les paramètres calés α et τ_∞ et sur leur impact sur la simulation.

5.1 Quantification d'incertitude

Afin de clarifier les développements à suivre, nous utilisons la notation suivante pour les sorties de simulations :

$$R(x, \beta) = R_{simu}(\Delta t, T, (\alpha_{T_i})_{i=1,\dots,n_T}, (\tau_{\infty,T_i})_{i=1,\dots,n_T})$$

où $x = (\Delta t, T)$ et $\beta = ((\alpha_{T_i})_{i=1,\dots,n_T}, (\tau_{\infty,T_i})_{i=1,\dots,n_T})$. Le paramètre β est donc celui dont l'incertitude doit être quantifiée. Nous notons β_{ref} sa valeur calée par méthode des moindres carrés (voir Table 1). De plus, nous supposons que localement autour de β_{ref} le code est linéaire en fonction de β :

$$R(x,\beta) = R(x,\beta_{ref}) + \sum_{i=1}^{p} \frac{\partial R(x,\beta_{ref})}{\partial \beta_i}(\beta_i - \beta_{ref,i}), \quad p = 2n_T, \quad \forall x.$$

Soit $R_{obs}(x)$ les valeurs observées de R suite aux essais EPRI. Puisque la simulation $R(x,\beta)$ n'est pas parfaite et que les essais expérimentaux peuvent être entachés d'un bruit, nous introduisons une erreur de modèle $\varepsilon(x)$ qui modélise l'écart entre la sortie réelle et la simulation :

$$R_{obs}(x) = R(x,\beta) + \varepsilon(x)$$

$\varepsilon(x)$ intègre à la fois l'erreur de mesure et celle de modèle. En revanche, le nombre d'expériences disponible est trop faible pour distinguer ces deux sources d'erreurs. Dans la suite, nous supposons $\varepsilon(x)$ identiquement distribué (non nécessairement gaussien), de moyenne nulle et de variance constante σ^2. Le modèle devient alors :

$$R_{obs}(x) = R(x,\beta_{ref}) + \sum_{i=1}^{p} \frac{\partial R(x,\beta_{ref})}{\partial \beta_i}(\beta_i - \beta_{ref,i}) + \varepsilon$$

Soit $\mathbf{D} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, $n = n_t \times n_T$, l'ensemble des $x = (\Delta t, T)$ observés :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} (1,680) \\ (6,680) \\ (15,680) \\ (30,680) \\ (1,750) \\ (6,750) \\ \vdots \\ (15,1150) \\ (30,1150) \end{pmatrix},$$

Nous avons la relation suivante entre les valeurs observées et la simulation :

$$R_{obs}(\mathbf{D}) = R(\mathbf{D},\beta_{ref}) + \mathbf{H}(\beta - \beta_{ref}) + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{9}$$

où $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_i)_{i=1,\ldots,n}$ est le bruit observé et $\mathbf{H}$ est le tenseur des suceptibilités défini par :

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R(x_1,\beta_{ref})}{\partial \beta_1} & \frac{\partial R(x_1,\beta_{ref})}{\partial \beta_2} & \cdots & \frac{\partial R(x_1,\beta_{ref})}{\partial \beta_p} \\ \frac{\partial R(x_2,\beta_{ref})}{\partial \beta_1} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial R(x_n,\beta_{ref})}{\partial \beta_1} & \cdots & \cdots & \frac{\partial R(x_n,\beta_{ref})}{\partial \beta_p} \end{pmatrix}$$

De l'équation (9), nous pouvons déduire la moyenne et la variance *a posteriori* (c'est-à-dire connaissant les observations) du paramètre β.

— Moyenne *a posteriori* de β :

$$\hat{\beta} = \beta_{ref} + \left(\mathbf{H}^T\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^T\left(R_{obs}(\mathbf{D}) - R(\mathbf{D},\beta_{ref})\right).$$

— Variance *a posteriori* de β :

$$\mathrm{var}(\beta) = \sigma^2\left(\mathbf{H}^T\mathbf{H}\right)^{-1}.$$

L'estimation du paramètre σ^2 est donnée par :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\left(R_{obs}(\mathbf{D}) - R(\mathbf{D},\beta_{ref}) - \mathbf{H}(\hat{\beta}-\beta_{ref})\right)^T\left(R_{obs}(\mathbf{D}) - R(\mathbf{D},\beta_{ref}) - \mathbf{H}(\hat{\beta}-\beta_{ref})\right)}{n-p}.$$

La moyenne $\hat{\beta}$ donne le biais entre β et sa valeur calibrée β_{ref} et la variance $\mathrm{var}(\beta)$ décrit l'incertitude sur le paramètre β. Ainsi, la nouvelle valeur calibrée du paramètre β prenant en compte l'erreur de modèle est donnée par $\hat{\beta}$ et la variabilité de β autour de cette valeur est donnée par $\mathrm{var}(\beta)$.

Une analyse de sensibilité a également été réalisée.

5.2 Résultats du calage du paramètre $\beta = (\alpha, \tau_\infty)$

Nous considérons le cas d'une loi élasto-plastique avec écrouissage isotrope linéaire. Les valeurs calées $\hat{\beta}$ de β et leur intervalle de confiance à 95% sont donnés dans la table 1.

TABLE 1 – Valeurs des coefficients α et τ_∞ en fonction de la température pour le calage avec quantification d'incertitude. I.C. 95% désigne l'intervalle de confiance à 95% sur la valeur calibrée du paramètre.

T	$\hat{\alpha}$	I.C. 95%	$\hat{\tau}_\infty$	I.C. 95%
680	1.154	$[2.200, 0.108]$	0.877	$[0.954, 0.800]$
750	1.335	$[2.080, 0.591]$	0.767	$[0.802, 0.733]$
825	1.308	$[1.966, 0.649]$	0.682	$[0.711, 0.653]$
900	1.165	$[1.554, 0.775]$	0.576	$[0.604, 0.550]$
1000	0.181	$[0.235, 0.127]$	0.071	$[0.118, 0.024]$
1075	0.687	$[0.792, 0.582]$	0.052	$[0.073, 0.031]$
1150	0.408	$[0.577, 0.238]$	0.045	$[0.103, -0.013]$

On remarque sur la table 1 que l'incertitude sur le paramètre α en fonction de la température est importante (les intervalles de confiance étant larges). En revanche les intervalles sur τ_∞ sont assez resserrés sur la valeur moyenne.

Les valeurs des indices de sensibilité font que deux singularités se remarquent. La première est que l'influence du paramètre α et généralement négligeable par rapport à celle du paramètre τ_∞ bien que son incertitude soit plus grande. Cela signifie que le gradient de la sortie du code est presque nul en fonction de α. La deuxième particularité est que α est influent uniquement pour $T = 1000$. On note aussi que $T = 1000$ est une température particulière. En effet, c'est la seule température où le profil de R en fonction du temps de maintien est significativement différent de celui des autres températures. Cette différence est d'autant plus notable que l'incertitude de α en $T = 1000$ est faible. Cela signifie que le gradient en $\alpha_{T=1000}$ est important.

6 Validation du modèle de restauration d'écrouissage

6.1 Principe des essais Satoh

La validation du modèle est réalisée en considérant un essai de dilatométrie bloquée (essai Satoh, voir [3]). Cet essai consiste à appliquer des cycles de chauffage-refroidissement sur une éprouvette bloquée en ses extrémités. Ce chargement thermomécanique autobridé est semblable au chargement observé lors du soudage multipasse. Des essais Satoh ont été réalisés dans [2] sur de l'acier 316L. Plusieurs configurations ont été considérées en variant la vitesse de refroidissement. Dans notre étude, nous considérerons le cas du refroidissement à l'air libre.

6.2 Résultats des essais Satoh

Le résultat de ces essais est reporté dans la table 2.

6.3 Simulation des essais Satoh

La simulation de ces essais est réalisée en modélisant uniquement la zone utile de l'éprouvette. Le maillage est constitué d'un élément hexaédrique. Le chargement thermique est une température imposée, uniforme dans tout le volume, et qui varie en fonction du temps. Ce chargement correspond aux cycles de températures mesurées expérimentalement. L'objectif de cette section est de comparer les valeurs des contraintes obtenues avec le modèle de restauration d'écrouissage aux valeurs expérimentales de la table 2.

TABLE 2 – Cycles thermiques et contraintes : Satoh avec refroidissement à l'air libre - Résultats expérimentaux ([2])
.

Cycle	Tmax (˚C)	σ en fin de cycle (MPa)	σ compression à 400˚C (MPa)
Cycle 1	1126	289	-163
Cycle 2	933	297	-193
Cycle 3	685	306	-200
Cycle 4	484	312	-209
Cycle 5	1126	302	-220

6.3.1 Simulation sans restauration d'écrouissage

Dans un premier temps, les essais Satoh sont simulés sans restauration d'écrouissage. Les résultats obtenus sont confrontés aux résultats expérimentaux (voir table 3).

TABLE 3 – Cycles thermiques et contraintes : Satoh avec refroidissement à l'air libre - Comparaison expérimental vs numérique (sans restauration d'écrouissage)
.

Cycle	Tmax (˚C)	$\sigma^{exp}_{fin\ cyc.}$ (Mpa)	$\sigma^{num}_{fin\ cyc.}$ (Mpa)	$\sigma^{exp}_{comp.}$ à 400˚C (Mpa)	$\sigma^{num}_{comp.}$. à 400˚C (Mpa)
Cycle 1	1126	289	377	-163	-194
Cycle 2	933	297	444	-193	-285
Cycle 3	685	306	482	-200	-350
Cycle 4	484	312	499	-209	-386
Cycle 5	1126	302	582	-220	-402

On observe une mauvaise approximation des contraintes en fin de cycle et à la température 400˚C. On constate également une dégradation des résultats (vis-à-vis des résultats expérimentaux) en fonction des cycles. Le résultat expérimental du dernier cycle est intéressant car il met clairement en évidence le phénomène de restauration d'écrouissage à haute température. Les contraintes résiduelles restent néanmoins supérieures à elles mesurées expérimentalement. Il serait nécessaire d'utiliser un modèle de plasticité plus riche (par exemple avec écrouissage mixte).

6.3.2 Simulation avec restauration d'écrouissage

On simule l'essai Satoh en activant notre modèle de restauration d'écrouissage. La table 4 illustre la comparaison entre les résultats obtenus et les résultats expérimentaux.

TABLE 4 – Cycles thermiques et contraintes : Satoh avec refroidissement à l'air libre - Comparaison expérimental vs numérique (avec restauration d'écrouissage)

Cycle	Tmax (˚C)	$\sigma^{exp}_{fin\ cyc.}$ (Mpa)	$\sigma^{num}_{fin\ cyc.}$ (Mpa)	$\sigma^{exp}_{comp.}$ à 400˚C (Mpa)	$\sigma^{num}_{comp.}$. à 400˚C (Mpa)
Cycle 1	1126	289	332	-163	-194
Cycle 2	933	297	357	-193	-240
Cycle 3	685	306	400	-200	-265
Cycle 4	484	312	422	-209	-306
Cycle 5	1126	302	345	-220	-326

On voit bien l'effet de la restauration d'écrouissage à la fin du cinquième cycle. Les résultats numériques sont bien plus conformes aux essais.

7 Conclusions et perspectives

Le modèle de restauration d'écrouissage est robuste, en particulier les résultats ne dépendent pas de la discrétisation temporelle. Ses paramètres sont recalés facilement à l'aide d'essais standards, ce qui n'est pas le cas des modèles proposés par [4] (voir aussi ([5]). De plus, on peut identifier à l'aide de n'importe quelle loi élastoplastique. Néanmoins, le cas de la viscoplasticité demanderait une modification de la loi de restauration d'écrouissage.

Références

[1] D. Qiao, W. Zhang, Z. Feng, P. Crooker, Y. Wang. *Modeling of Weld Residual Plastic Strain and Stress in Dissimilar Metal Butt Weld in Nuclear Reactors*, IPVP conference, 2013.

[2] L. Depradeux. *Simulation numérique du soudage, acier 316L. Validation sur cas-tests de complexité croissante*, thèse de doctorat, INSA Lyon, 2004.

[3] K. Satoh, T. Ohnishi. *Transient thermal stresses of Weld Heat-Affected Zone by Both-Ends Fixed Bar Analogy*, Transactions of Japan Welding Society, 1972, Vol. 3, pp.125-134.

[4] J.-B. Leblond. *Mathematical modelling of transformation plasticity in steels. Coupling with strain hardening phenomena*, International Journal of Plasticity, Vol. 5, pp. 573-591 – 1989.

[5] F. Waeckel. *Une loi de comportement thermo-métallurgique des aciers pour le calcul mécanique des structures*, thèse de doctorat, ENSAM, 1994.

[6] *code_aster et salome_meca, plateforme de simulation en thermomécanique*, logiciel Open Source sur www.code-aster.org, EDF, 1989-2017.