HAL
open science

Modélisation Elasto-Viscoplastique du Comportement des Aciers

Jean-Marc Pipard, Farid Abed-Meraim, Tudor Balan, Marcel Berveiller, Olivier Bouaziz, Xavier Lemoine

To cite this version:

Jean-Marc Pipard, Farid Abed-Meraim, Tudor Balan, Marcel Berveiller, Olivier Bouaziz, et al.. Modélisation Elasto-Viscoplastique du Comportement des Aciers. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-01217581

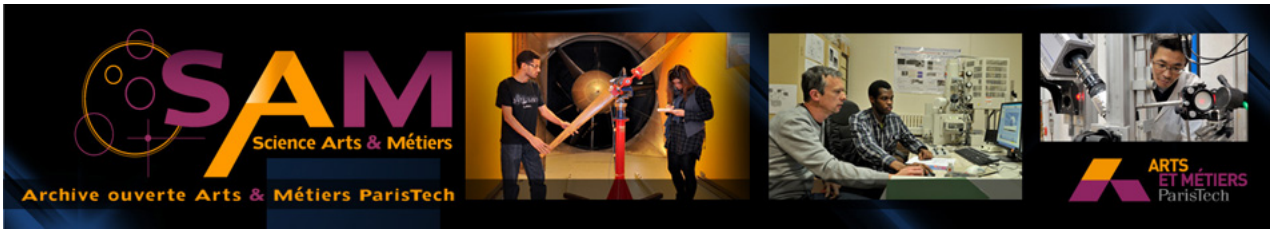
HAL Id: hal-01217581

https://hal.science/hal-01217581v1

Submitted on 19 Oct 2015

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.



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: http://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/10355

To cite this version :

Jean-Marc PIPARD, Farid ABED-MERAIM, Tudor BALAN, Marcel BERVEILLER, Olivier BOUAZIZ, Xavier LEMOINE - Modélisation Elasto-Viscoplastique du Comportement des Aciers - In: 18ème Congrès Français de Mécanique, France, 2007-08-27 - 18ème Congrès Français de Mécanique - 2007

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : archiveouverte@ensam.eu

Modélisation Elasto-Viscoplastique du Comportement des Aciers

J.-M. Pipard[a], F. Abed-Meraim[a], T. Balan[a], M. Berveiller[a], O. Bouaziz[b], X. Lemoine[b]
[a]Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux, UMR CNRS 7554,
ENSAM, 57078 Metz, France.
[b]Arcelor Research, 57283 Maizières-les-Metz, France.

Email : Jean-Marc.PIPARD@metz.ensam.fr

Résumé :

Dans cet article, une modélisation des différentes phases (ferrite, perlite etc….) d'un acier multiphasé est proposée moyennant une loi phénoménologique à base physique. La description unifiée du comportement viscoplastique peut être décrite à partir de lois de type sinus hyperbolique. Dans cette optique, une loi en sinus hyperbolique est utilisée afin de décrire de façon physiquement acceptable l'ensemble des comportements asymptotiques du comportement viscoplastique. L'écrouissage de chacune des phases est de type combiné (isotrope et cinématique) incluant l'effet de vitesse de déformation propre au comportement visqueux. A partir d'un modèle de comportement monotone unidimensionnel d'inspiration métallurgique, nous développons une formulation tridimensionnelle incrémentale, en déterminant l'expression du potentiel dont découlent les lois de comportement correspondantes.
La capacité du modèle ainsi obtenu à décrire le comportement élasto-viscoplastique d'une phase est testée au travers de simulations de tests rhéologiques décrivant différents chemins de déformation à différentes vitesses de déformation. Une discussion basée sur la comparaison de ces simulations avec des résultats expérimentaux sur un acier 100% ferritique est présentée.

Abstract :

In this work, an elastic-viscoplastic behaviour modelling of multi-phase steels at large strain-rates is presented. For each phase (ferrrite, perlite etc…), an advanced physically based viscoplastic constitutive model is adopted. Viscoplastic behaviour can be described by hyperbolic sine function. A new physically based constitutive law suitable to capture all the main features of viscoplasticity is used. In this study, the model has been extended to three dimensional framework in view of numerical implementation in a finite element code.
The ability of this modelling framework to describe the behaviour of steels at high strain-rates is explored by means of simulations of rheological tests at various strain-rates and involving different strain paths. The model is applied to a 100% polycrystalline ferritic steel. Numerical results in terms of strain rate sensitivity and Bauschinger effect are discussed and compared with experimental ones.

Mots-clefs :

Elasto-viscoplasticité ; Aciers Multiphasés ; Loi de Comportement

1 Introduction

Le multiphasage est un moyen puissant pour produire des nuances d'aciers performantes, alliant des propriétés souvent antagonistes : une grande résistance mécanique associée à une ductilité accrue. La modélisation prédictive de la réponse de ces matériaux sous chargements complexes, non monotones est primordiale pour les constructeurs automobile afin d'optimiser leur microstructure.

Modéliser la sensibilité à la vitesse d'un acier multiphasé est une tâche difficile compte tenu des différentes sensibilités à la vitesse de déformation de chacune des phases le constituant.

Dans le cadre d'une approche micromécanique par transition d'échelles, il est primordial, dans un premier temps, de savoir décrire le comportement local de chacune de ces phases avant de pouvoir décrire le comportement global homogénéisé du multiphasé.

L'article présente la première partie d'une étude qui vise la mise en place d'un outil d'homogénéisation intégrable dans le logiciel de simulation par éléments finis Abaqus capable de décrire le comportement élastoviscoplastique des aciers multiphasés.

La première partie de cette étude propose la modélisation des différentes phases (ferrite, perlite etc.…) d'un acier multiphasé par une loi phénoménologique basée sur la physique. Cette première partie confronte les résultats du modèle avec les résultats expérimentaux pour un acier 100% ferritique.

2 Modèle viscoplastique

2.1 Loi viscoplastique prenant en compte la métallurgie

Allain *et al.* (2007) généralisent le formalisme décrivant la contrainte d'écoulement dans le cas de matériaux cubiques centrés initié par Rauch (1993) :

$$\sigma=\sigma_0+\frac{\sigma^*}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{\left(\sigma^*\right)^2+4\left(\sigma_i\right)^2} \tag{1}$$

où σ_0 est la contrainte de friction dépendante des éléments en solution solide, σ^* la contrainte effective requise afin de surmonter les obstacles microstructuraux à l'aide des fluctuations thermiques et σ_i la contrainte interne qui gêne le mouvement des dislocations.

En se basant sur la relation de Orowan, où la vitesse des dislocations est déterminée par la fréquence de franchissement des obstacles, Allain *et al.* (2007) couplent le formalisme de Rauch (1993) à une loi en sinus hyperbolique, proposant alors une loi de comportement originale :

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{vp}=2M\rho_m v_{debye} b^2 \exp\left(\frac{-\Delta G_0}{kT}\right)\sinh\left(\frac{\sigma^* V^*}{kT}\right) \tag{2}$$

où M est le facteur de Taylor, ρ_m la densité de dislocations mobiles, v_{debye} la fréquence de Debye, b la norme du vecteur de Burgers, ΔG_0 l'énergie d'activation, V^* le volume d'activation, k la constante de Boltzmann et T la température en Kelvin.

Cette loi, développée initialement pour des chargements monotones, a été validée dans le cas unidimensionnel sur des aciers 100% ferritiques et des dual-phases. Dans cette étude, nous étendons la validité de cette loi dans le domaine tridimensionnel pour le cas de chargements dynamiques avec changements de trajets de déformation.

2.2 Modélisation incrémentale tridimensionnelle

Afin de développer un modèle de comportement viscoplastique utilisant une loi de type sinus hyperbolique, on définit un potentiel viscoplastique stable au sens des matériaux standards généralisés, c'est-à-dire positif et convexe (Halphen *et al.* (1974, 1975)) de la forme suivante :

$$\Omega=AB\cosh\left(\frac{\left\langle\sigma_{eq}-Y\right\rangle}{A}\right) \tag{3}$$

où A, B et Y sont des constantes du matériau.

On fait l'hypothèse que le potentiel dépend du tenseur contrainte $\boldsymbol{\sigma}$ seulement au travers de la contrainte équivalente :

$$\Omega\left(\boldsymbol{\sigma}\right)=\Omega\left(\sigma_{eq}\left(\boldsymbol{\sigma}\right)\right) \tag{4}$$

Par dérivation de ce potentiel, la loi d'évolution de la déformation viscoplastique est obtenue par la relation :

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{vp} = \frac{\partial \Omega}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_{eq}} \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \tag{5}$$

Pour un matériau de type von Mises, et par équivalence en dissipation, on a :

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} = \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_{eq}} \text{ et } \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \frac{3}{2} \frac{\left(\underline{\underline{\sigma}}' - \underline{\underline{X}}\right)}{\sigma_{eq}} \tag{6}$$

ou $\boldsymbol{\sigma}'$ est le déviateur des contraintes et **X** représente la contrainte de rappel, décrivant de manière macroscopique l'écrouissage cinématique.

L'expression du tenseur du taux de déformation viscoplastique se résume alors à :

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{vp} = \frac{\partial \Omega}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} \frac{3}{2} \frac{\left(\underline{\underline{\sigma}}' - \underline{\underline{X}}\right)}{\sigma_{eq}} \tag{7}$$

L'expression du taux de déformation viscoplastique équivalent suivant une loi de type sinus hyperbolique :

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} = \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_{eq}} = B \sinh\left(\frac{\left\langle \sigma_{eq} - Y \right\rangle}{A}\right) \tag{8}$$

Des lois de comportement utilisant le sinus hyperbolique ont été initialement proposées par Jonas *et al.* (1969). Il a été montré par Langkruis *et al.* (1999) que nombre de modèles de comportement viscoplastique (lois puissance, lois exponentielles, lois en sinus hyperbolique) pouvaient être dérivés de l'équation exponentielle saturante générale proposée par Sah *et al.* (1969). La loi en sinus hyperbolique peut alors être réduite à une loi en puissance pour de faibles contraintes et à une loi exponentielle pour de très fortes contraintes, ce qui de ce fait lui confère une validité plus générale (Langkruis *et al.* (1999)).

2.3 Lois d'écrouissage

La taille Y de la surface de plasticité évolue avec l'écrouissage isotrope. La loi d'évolution choisie décrivant l'écrouissage isotrope est une loi différentielle de type Voce :

$$\dot{R} = C_R (R^{sat} - R) \dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} \tag{9}$$

où C_R et R^{sat} sont des paramètres de matériau.

La loi d'évolution choisie décrivant l'écrouissage cinématique est une loi différentielle de type Armstrong-Fredericks :

$$\dot{\underline{\underline{X}}} = C_x (X^{sat} \underline{\underline{N}} - \underline{\underline{X}}) \dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} \tag{10}$$

où **N** est la direction du tenseur vitesse de déformation alors que C_x et X^{sat} sont des paramètres de matériau.

3 Application au comportement d'un acier ferritique

La validation du modèle présenté a été faite sur un acier IF (100% ferritique) de taille moyenne de grains de 20 microns dont la composition chimique est donnée dans le TAB. 1. Les paramètres matériaux utilisés pour la simulation sont donnés dans le TAB. 2.

Acier IF	C	Mn	P	S	N	Al	Ti	Nb	Si	Cu	Cr	Ni	Zr
120	8,6	124	6	9	3,9	44	126	<1	8	16	24	20	<1

TAB.1 - Composition Chimique (10-3 % poids).

M	ρ_m (m^{-2})	v_{debye} (s^{-1})	b (m^{-1})	K ($J.K^{-1}$)
3	0.4	10^{13}	$2.5\ 10^{-10}$	$1.38.10^{-23}$

TAB. 2 – Paramètres matériaux utilisés lors des simulations.

3.1 Identification des paramètres du modèle

Sept paramètres ont été identifiés : σ_0, C_R, R^{sat}, C_x, X^{sat}, ΔG_0 et V^* à partir d'essais de traction uniaxiale à différentes vitesses de déformation (FIG.1) et d'essais de cisaillement Bauschinger avec différentes prédéformations (FIG. 2). L'ensemble des paramètres identifiés est reporté dans le TAB. 3 :

σ_0 (MPa)	C_R	R^{sat} (MPa)	C_x	X^{sat} (MPa)	ΔG_0 (eV)	V^* (m^3)
160	16	200	100	12	0,29	$7b^3$

TAB. 3 – Paramètres identifiés pour les aciers IF.

Les paramètres d'écrouissage cinématique sont en accord avec les observations expérimentales concernant l'évolution de la contrainte interne de polycristaux de ferrite en fonction de la taille de grain (Bouaziz et al., 2006).

3.2 Résultats et discussion

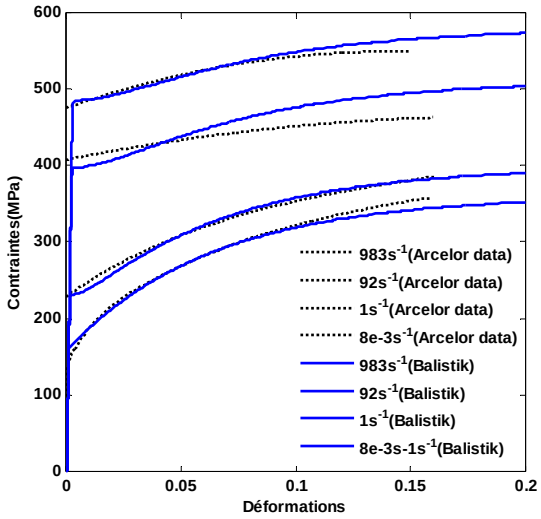


FIG. 1 – Courbes contraintes-déformations.
Comparaison entre l'expérience (en pointillés) et le modèle (en trait plein) pour des essais de traction monotone à différentes vitesses de déformations.

Sur la FIG. 1, il apparaît que le modèle décrit bien l'évolution de la limite d'élasticité même s'il est connu que celle-ci est difficilement mesurable pour de très grandes vitesses de

déformations compte tenu de la méthode expérimentale utilisée. Dans ce cas, la géométrie de l'échantillon influence de manière conséquente les courbes contraintes-déformation et ce, particulièrement en traction (Rusinek *et al.* (2001)).

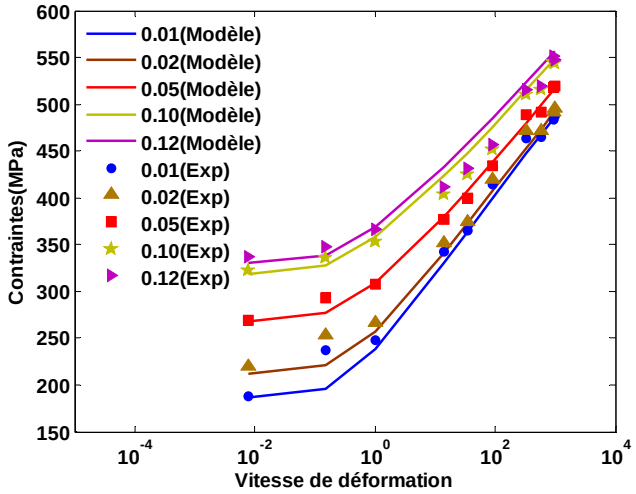


FIG. 2 – Evolution de la contrainte d'écoulement à différents taux de déformation en fonction de la vitesse de déformation.Comparaison entre l'expérience (symboles) et le modèle (en trait plein) pour des essais de traction monotone.

Afin de prendre en compte ces considérations, il est de plus en plus courant de trouver dans la littérature des analyses de la sensibilité à la vitesse de déformation de la contrainte d'écoulement à 2% ou 5 % de déformation (Uenishi *et al.*(2004)). La FIG. 2 met en évidence la bonne description du modèle vis-à-vis de la sensibilité à la vitesse de la limite d'écoulement pour différents taux de déformations.

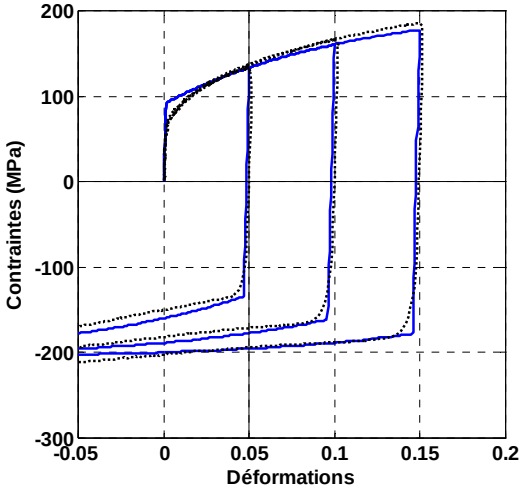


FIG. 3 – Courbes de cisaillement Bauschinger.
Comparaison entre l'expérience (en pointillés) et le modèle (en trait plein) pour des essais de cisaillement Bauschinger pour une vitesse de déformation de 1,73.10-3 s-1 pour 3 prédéformations : 5%, 10% et 15%.

Sur la FIG. 3, la réponse du modèle est confrontée à des essais de cisaillement Bauschinger. Le modèle décrit bien la diminution de la limite d'élasticité lors du trajet inverse.

4 Conclusions et perspectives

Un nouveau modèle (Allain *et al.* 2007) capable de décrire la sensibilité à la vitesse de déformation des aciers a été étendu dans le cas tridimensionnel et identifié pour des aciers IF. La gamme de vitesses de déformation sur laquelle peut être appliqué le modèle est large puisque validé dans un premier temps pour des vitesses de déformation comprises entre 0.01s-1 et 1000s-1.

Afin de décrire l'ensemble des caractéristiques propres à la viscoplasticité, il reste à décrire le comportement du modèle vis-à-vis des effets liés à la température : adoucissement de l'acier lorsque la température augmente. Des travaux sont en cours afin de vérifier la robustesse du modèle en température puis d'étendre la validation du modèle à d'autres types d'aciers (100% perlitique). L'étude vise à plus long terme la mise en place d'un outil d'homogénéisation intégrable dans le logiciel de simulation par éléments finis Abaqus capable de décrire le comportement élastoviscoplastique des aciers multiphasés.

Références

Allain, S., Bouaziz, O., Lemoine, X. 2007 En cours de publication.

Bouaziz, O., Dirras, G. 2006 Effet de taille de grain sur les écrouissages isotrope et cinématique dans la gamme 0,35 à 75 mirons. *Dijon, Matériaux 2006*, 13-17 Novembre 2006.

Langkruis, J. van de, Kool, W.H., Zwaag, S. van der. 1999 Assessment of constitutive equations in modelling the hot deformability of some overaged Al-Mg-Si alloys with varying solute contents. *Mater. Sci. Eng*. **A266**, pp. 135-145.

Jonas, J.J., Sellars, C.M., Tegart, W.J. McG., Strength and structure under hot working conditions. *Int. Met. Rev.* **14**, pp. 1-24.

Halphen, B., Nguyen, Q-S. 1974 Plastic and viscoplastic materials with generalized potential. *Mechanics Research Communication*. **1**, pp. 43-47.

Halphen, B., Nguyen, Q.S. 1975 Sur les matériaux standard généralisés. *J. de Mécanique*. **14**(1), pp. 39-63.

Rauch, E. 1993 Etude de l'écrouissage des métaux : aspects microstructuraux et lois de comportement. *Mémoire d'habilitation à diriger des recherches*, ING-Grenoble.

Rusinek, A., Klepaczko, J.R., 2001 Shear testing of a sheet steel at wide range of strain rates and a constitutive relation with strain-rate and temperature dependence of the flow stress. *Int. J. Plasticity.* **17**, 87.

Sah, J.P., Richardson, G.J., Sellars, C.M. 1969 Plane strain compression testing at elevated temperature. *J. Austr. Inst. Met.* **14**, 292.

Uenishi, A., Teodosiu, C., 2004 Constitutive modelling of the high strain rate behaviour of interstitial-free steel. *Int. J. Plasticity*. **20**, pp 915-936.