

Effect of viscous criteria on the prediction of transformation induced plasticity in steels: Finite Element Modeling approach

M. EL HAJ KACEM^a, F. BARBE^a, N. LECOQ^{b,c}

- a. INSA Rouen, Groupe de Physique des Matériaux, CNRS UMR 6634, Normandie Université, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France.
E-mail: maher.el_haj_kacem@insa-rouen.fr, fabrice.barbe@insa-rouen.fr.
- b. Université de Rouen, Groupe de Physique des Matériaux, CNRS UMR 6634, Normandie Université, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France
- c. Université de Rouen, Morphodynamique Continentale et Côtière M2C, CNRS UMR 6143, Normandie Université, 76130, Mont-Saint-Aignan, France.
E-mail: nicolas.lecoq@univ-rouen.fr.

Résumé :

*Dans cet article nous analysons, les conséquences mécaniques des transformations de phase dans les aciers, particulièrement, la plasticité de transformation induite **TRIP** (Transformation Induced Plasticity) ainsi que le comportement élasto-viscoplastique. Cette plasticité de transformation, explicable par le mécanisme de Greenwood-Johnson, est souvent décrite avec le modèle de Leblond [1] qui fait l'hypothèse d'un comportement purement plastique. Par ailleurs, dans la majorité des analyses expérimentales [2, 3] ou dans les modélisations numériques par éléments finis (FEM) [4, 5] ou encore dans les modélisations par champ de phase (PFM) [6 – 9]; une des grandes hypothèses, toujours adoptée, est de ne pas prendre en compte la viscosité. En revanche, plusieurs études récentes [10 – 12], démontrent que le comportement des deux phases (parente et produite), est très sensible au taux de déformation imposé, particulièrement à haute température. D'où le grand intérêt d'étendre les principales modélisations de référence comme celles de Leblond [1] et Taleb & Sidoroff [13], en tenant compte des effets visqueux présents lors de certaines transformations, particulièrement à haute température.*

Dans cette étude, le comportement de chaque phase est décrit par une loi élastoviscoplastique à écrouissage mixte associée à la loi de Norton, la cinétique de transformation est imposée et le problème d'interactions mécaniques entre phases est traité par la méthode des Eléments Finis (EF). D'une part, la contribution de la viscosité au TRIP est quantifiée pour différents taux de déformation imposés durant la transformation de phase. D'autre part, l'effet du taux de transformation (configuration arbitraire) sur la prédiction du TRIP est évalué et caractérisé. Les prédictions montrent que dans de tels cas la prise en compte de la viscosité peut conduire à des changements majeurs au niveau de la prédiction de plasticité de transformation induite résiduelle (par un facteur de 2), comparée aux résultats obtenus par un modèle plastique. Cette étude permet par ailleurs de dégager des tendances évidentes dans les relations entre TRIP, chargement et cinétique de transformation. Ces résultats pourront contribuer à l'élaboration d'un modèle analytique simple prenant en compte la viscosité.

Abstract:

In this paper, the mechanical consequences of phase transformations in steel, particularly, the Transformation Induced Plasticity TRIP as well as the elasto-viscoplastic behavior have been analyzed. This transformation plasticity, due to the Greenwood-Johnson mechanism, is often described with the model of Leblond [1] with the assumption of a purely plastic behavior. Moreover, in the majority of experimental analysis [2, 3] or numerical finite elements modeling FEM [4, 5] or phase field modeling PFM [6 – 9], the viscous criteria were not considered. However, several recent studies [10 – 12] have demonstrated that both phases (parent and product) show high strain-rate sensitivity at elevated temperatures. Hence, the principal interests using the FEM modeling to extend these main reference models (Leblond [1], Taleb & Sidoroff [13]), with taking into account the viscous effects, which are present during some transformations, especially at high temperatures.

In this study, the behavior of each phase is described by an elastoviscoplastic law with mixed hardening associated to the Norton law. The transformation kinetics is imposed and the problem of mechanical interactions between phases is processed by the Finite Element Method (FEM). On the one hand, the contribution from viscosity to TRIP was quantified for different strain-rate sensitivities of the parent and product phases. On the other hand, the effect of the (arbitrarily-set) phase transformation-duration in the FEM simulations was evaluated and characterized. The results show that in such cases, taking into account the viscosity criteria can lead to a major change in the prediction of the residual transformation induced plasticity compared to the results obtained using plastic model (by a factor of two). This study allows to identify obvious trends in the relationship between TRIP, loading, and transformation kinetics. These results will contribute to the development of a simple analytical model taking into account the viscous criteria.

Keywords: Transformation induced plasticity (TRIP); Elasto-viscoplasticity; Finite Element Modeling; Diffusive transformations; Steels.

Mots-clés : Plasticité de transformation ; Elasto-viscoplasticité ; Modélisation par Eléments Finis ; Transformations diffusives ; Aciers.

1 Introduction

La plasticité de transformation induite est classiquement définie comme une déformation irréversible observée au cours d'une transformation métallurgique sous une contrainte externe qui est inférieure à la limite d'élasticité de la phase la plus molle. Plusieurs études [13 - 15] démontrèrent la nécessité de prendre en compte ce phénomène afin de prédire correctement les distorsions, plus particulièrement dans le cas d'un refroidissement relativement lent. Parmi les domaines d'études concernés par ce phénomène, il y a bien sûr le traitement thermique et le soudage, où le matériau subit une transformation métallurgique au cours du refroidissement.

Dans cette étude, nous sommes intéressés par les conséquences mécaniques des transformations de phase, plus particulièrement, la plasticité de transformation induite communément

appelée TRIP. Il s'agit d'une déformation plastique survenant lorsque la transformation est combinée avec une charge mécanique externe. Ce phénomène est expliqué par le mécanisme, dit de Greenwood-Johnson, [16] et peut-être interprété à partir des interactions élastoplastiques locales pendant la croissance de la phase produite par diffusion et lesquelles se développent préférentiellement dans la direction de la contrainte appliquée.

Les modèles de référence existant (Leblond, 1989, Taleb & Sidoroff, 2003), peuvent fournir des prévisions raisonnables de TRIP par rapport aux observations expérimentales à l'échelle macroscopique mais ils sont limités dès qu'il s'agit de rendre compte d'essais complexes, par exemple si un pré-écrouissage est appliqué avant la transformation de phase. D'autre part, ces modèles de prévision sont fondés sur des hypothèses fortes telles que l'homogénéité des propriétés dans chaque phase, une plasticité ne pouvant émerger que de la phase parente et surtout une insensibilité aux taux de déformation, c'est-à-dire un comportement sans viscosité bien que les températures pour les transformations de phase considérées soient en général élevées. Cette même hypothèse est adoptée dans la plupart des approches de la modélisation de TRIP, que ce soit par transformée de fourrier rapide [17], champ de phase PFM [6, 7, 8, 9], ou encore éléments finis FEM [4, 5]. Néanmoins, plusieurs études récentes [10 – 12] ont démontré que le comportement mécanique des deux phases (parente et produite) est très dépendant du taux de déformation imposé, particulièrement à haute température. Par conséquent, ces modèles de référence ne peuvent pas être utilisés pour étudier avec précision l'interaction locale entre le processus de transformation de phase et l'évolution de la microstructure cristalline, qui est une question clé pour de nombreux problèmes multi-physiques.

D'où le principal intérêt de cette étude qui vise à étendre ces principales modélisations de référence, en utilisant la modélisation par éléments finis, tout en tenant compte des effets visqueux présents durant la transformation de phase à haute température.

2 Modélisation de la plasticité de transformation induite

2.1 Concept général

A partir de travaux fondateurs basés sur le mécanisme de Greenwood-Johnson [16] ainsi que les modélisations micromécaniques et numériques de références (Ganghoffer et al. [4], Barbe et al. [5], Tahimi et al. [10], Taleb and Sidoroff [13], Leblond [1]), nous présentons une modélisation basée sur l'homogénéisation, en utilisant un volume élémentaire représentatif (RVE) suffisamment grand pour contenir les deux phases (l'austénite, comme phase parente et la perlite comme phase produite), où cette dernière se développe au détriment de la phase parente d'une façon isotrope. La figure 1, résume et schématise la configuration de transformation traitée par cette modélisation.

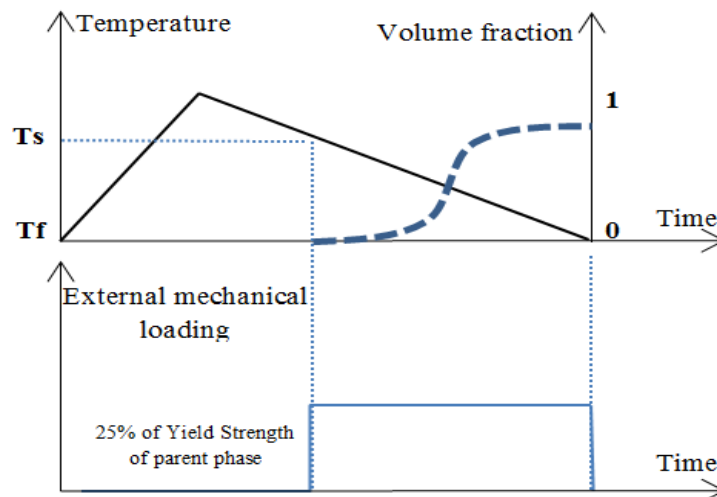


Figure.1 : Représentation schématique d'un test de TRIP classique (avec une cinétique de croissance imposée) lors du refroidissement (austénite-perlite) avec application d'une charge externe lors de la transformation; T_s et T_f représentent respectivement la température de début et de fin de la transformation.

2.2 Calcul numérique par élément finis

Les calculs sont basés sur la méthode des éléments finis et tentent de modéliser un élément de volume macroscopique représentatif des propriétés mécaniques de la zone utile d'une éprouvette soumise aux essais expérimentaux. La cinétique de transformation est imposée et supposée ne dépendre en aucun cas des interactions d'origine mécanique mise en jeu dans le domaine du calcul. Les figures 2 et 3, présentent les modèles numériques de référence: respectivement le modèle à germination périodique et celui à germination aléatoire. Ces modélisations ont subi des développements en vue de les rapprocher de la réalité physique, particulièrement en ce qui concerne la cinétique de transformation et les équations constitutives des lois de comportement des phases parente et produite [5 ; 18 - 20]. Pour le cas de modèle périodique, la phase parente ainsi que la phase produite sont supposées obéir aux lois de comportement macroscopique homogènes. Les germes de la nouvelle phase sont alors distribués de façon périodique dans l'espace occupé par la phase parente (figure 2). Ce type de germination (périodique) permet de réduire au minimum la taille d'un domaine de calcul mais conduit à une cinétique peu fidèle à la physique. Cependant, le modèle aléatoire est plus compliqué que le modèle périodique mais la cinétique est plus fidèle à la physique et peut-être décrite avec la théorie KJMA [18]. Les germes de la nouvelle phase peuvent apparaître tous simultanément dans des positions aléatoires dans l'espace, comme ils peuvent suivre une distribution aléatoire à la fois dans l'espace et dans le temps (figure 3). Les différences entre ces modélisations résident dans la cinétique globale de transformation imposée et les lois de comportement de chacune des phases parente et produite.

Les résultats préliminaires montrent que le fait d'introduire ou non la viscosité dans les paramètres matériau a des conséquences sur la prédiction de la plasticité de transformation induite. De ce fait, en préalable à une caractérisation systématique de l'effet de la viscosité sur le TRIP, nous avons effectué une analyse de la sensibilité du comportement élasto-visco-plastique en traction aux paramètres (K, n) de la loi de Norton. La figure 4 représente dans l'espace des paramètres (K, n) la

différence de contrainte maximale atteinte pour deux vitesses de traction données. Cela permet d'identifier les valeurs de (K, n) pour lesquels la viscosité sera la plus influente sur le comportement, et ce pour chacune des phases. Ce résultat est conforme aux identifications des paramètres élasto-viscoplastique effectuées sur un acier 100Cr6 soumis à des essais de traction et relaxation, dans son état de phase parente et dans son état de phase produite.

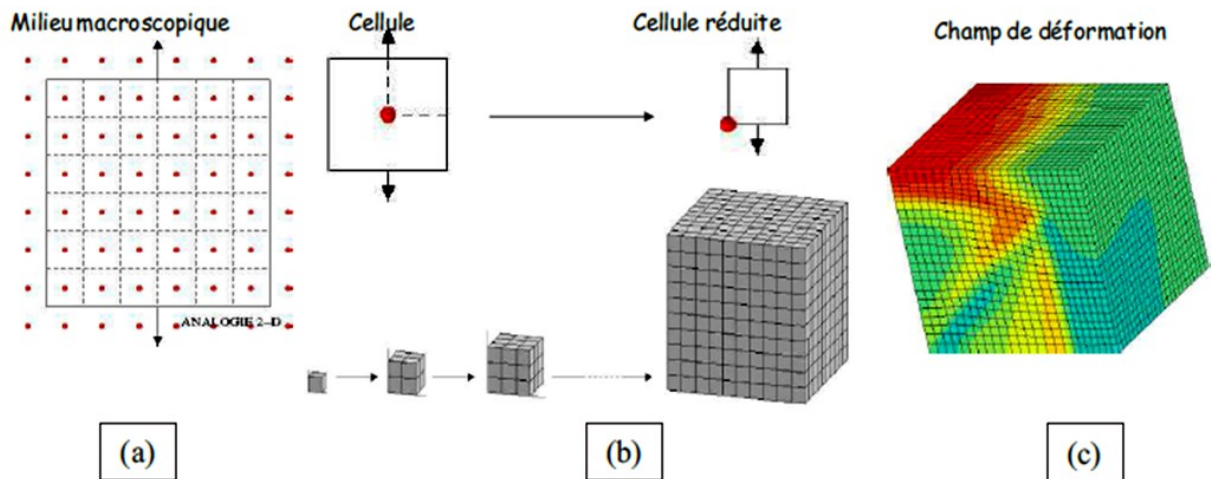


Figure.2 : Modèle à germination périodique : (a) Schéma illustratif des hypothèses simplificatrices sur la morphologie et la cinétique de transformation (analogie en 2D). (b) Croissance du germe de la phase naissante, les 3 premières étapes et la dernière étape de transformation. (c) Champ de déformation.

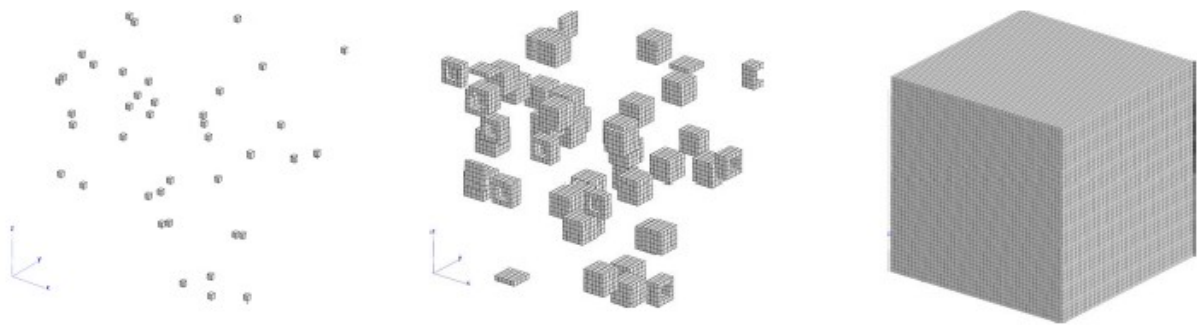


Figure.3 : Modèle à germination aléatoire : Régions occupées par la phase produite aux trois premières étapes et à la dernière étape de transformation dans le cas de germes répartis aléatoirement dans l'espace.

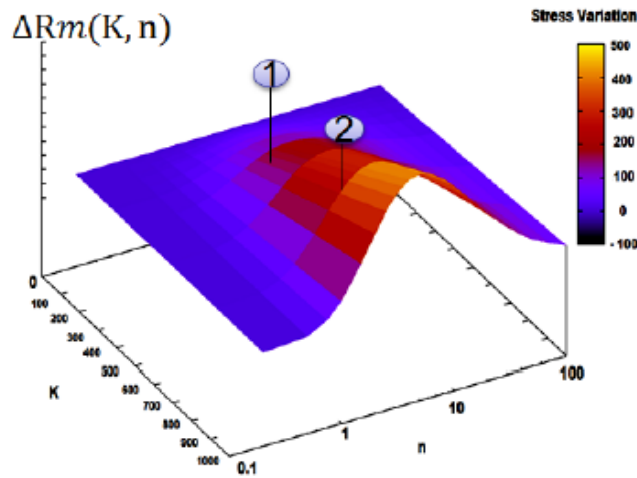


Figure.4 : Analyse de la sensibilité du comportement élasto-visco-plastique aux paramètres (K,n) de la loi de Norton : représentation dans l'espace des paramètres (K,n) de la différence de contrainte maximale en traction atteinte pour deux vitesses de chargement données.

Les simulations par éléments finis sont effectuées en utilisant le logiciel Zset (<http://www.zset-software.com/>) développé par l'ONERA (<http://www.onera.fr/>), Mines Paristech (France) et <http://www.nwnumerics.com>. Les interactions mécaniques entre phases créent des champs de déformation et de contrainte très hétérogènes au voisinage de l'interface et sont à l'origine d'une micro-plasticité locale [5]. Celle-ci, une fois moyennée sur le domaine complet d'étude, constitue la déformation permanente induite par transformation de phase ou encore le TRIP.

3 Principaux résultats

Dans cette partie, nous présentons une sélection des principaux résultats de simulations du TRIP. L'effet de la contrainte externe et celui du taux de transformation sont analysés en utilisant un modèle élasto-visco-plastique à germination aléatoire et périodique. La figure 5 montre une forte proportionnalité du TRIP en fonction de la contrainte appliquée, quelle que soit la cinétique imposée (périodique ou aléatoire) et quel que soit le taux de transformation. Ces résultats donnent un accord de premier ordre avec les modélisations analytiques ou numériques de référence citées précédemment.

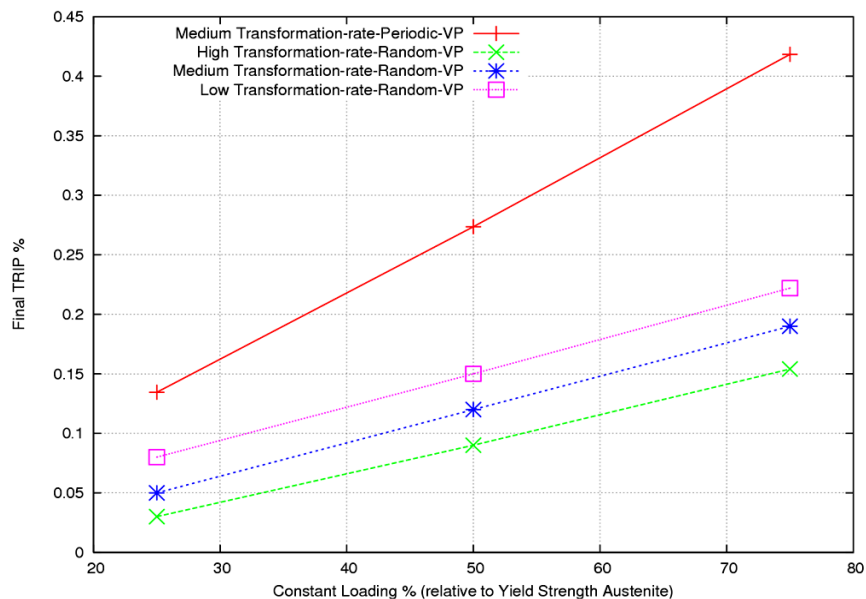


Figure.5 : Evolution du TRIP (modèle elasto-visoplastique à germination aléatoire et périodique) en fonction de la contrainte appliquée durant le processus de transformation de phase. Résultats pour plusieurs niveaux de taux de transformation.

D'autres résultats de prédiction du TRIP sont représentés sur la figure 6 : ils montrent que le TRIP décroît lorsque le nombre de germes de la phase augmente. Ceci est cohérent avec les analyses menées en élasto-plasticité dans [18] et [19] avec un modèle à germination aléatoire et confirme que toute prédiction de TRIP basée sur une évolution hétérogène de microstructure nécessite que le taux de germination dans la microstructure soit bien établi.

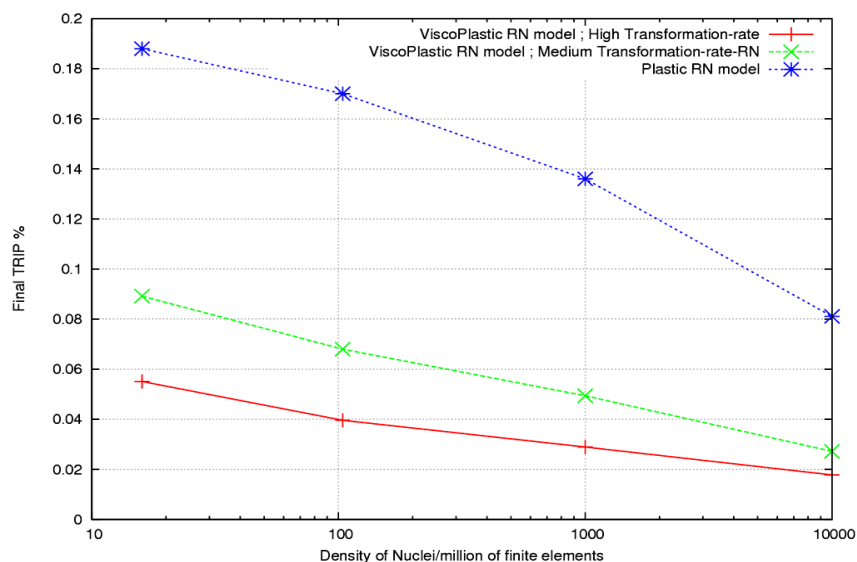


Figure.6 : Effet de la densité de germination et du taux de transformation sur la plasticité de transformation dans le modèle à germination aléatoire. Résultats de simulations d'un essai TRIP classique en traction de 25MPa comparés à la prédiction d'un modèle plastique.

4 Conclusion et perspectives

Les simulations numériques par éléments finis FEM pour une transformation de phase diffusives sous chargement externe ont été réalisées. Nous montrons que la plasticité de transformation induite TRIP est proportionnelle à la contrainte appliquée quel que soit le taux de transformation et quelle que soit la cinétique (périodique ou aléatoire). De même, nous mettons en évidence que le TRIP est proportionnel au logarithme de la densité de germes quel que soit le taux de transformation et quel que soit le taux de chargement. Ce qui confirme que toute prédiction de TRIP basée sur une évolution hétérogène de microstructure nécessite que soit bien établi le taux de germination dans la microstructure. Par conséquent, il est nécessaire d'établir une distinction entre les contributions plastique et visqueuse, car il a été montré, via ce travail, que le TRIP est potentiellement une déformation visco-plastique. Des travaux sont en cours de réalisation afin d'étendre cette configuration en utilisant le modèle de transformation de polycristal à polycristal où le comportement de chaque phase est décrit par la plasticité cristalline [21].

Références

- [1] Leblond, J.B., Mathematical modeling of transformation plasticity in steels II: coupling with strain hardening phenomena *Int J Plasticity* 5:573–591, 1989.
- [2] L. Taleb, N. Cavallo and F. Waeckel, Experimental analysis of transformation plasticity, *Int J Plasticity*, 17:1-20, 2001
- [3] L. Taleb and S. Petit, New investigations on transformation induced plasticity and its interaction with classical plasticity, *Int J Plasticity*, 22:110-130, 2006.
- [4] Ganghoffer, J.F., Denis, S., Gautier, E., Simon, A., Sjöström, S., Finite element calculation of the micromechanics of a diffusional transformation. *Eur J Mech A/Solids* 12:21-32, 1993.
- [5] F. Barbe, R. Quey and L. Taleb, Numerical modeling of plasticity induced during diffusives transformation, case of a cubic array of nuclei, *Eur J Mech A/Solids*, 26(4):611-625, 2007.
- [6] A. Yamanaka, T. Takaki and Y. Tomita, Phase-Field Simulation of Austenite to Ferrite Transformation and Widmanstätten Ferrite formation in Fe-C Alloy, *Materials Transactions*, 47(11):2725-2731, 2006.
- [7] A. Yamanaka, T. Takaki and Y. Tomita, Simulation of Austenite-to-ferrite Transformation in Deformed Austenite by Crystal Plasticity Finite Element Method and Multi-phase-field Method, *Int J Iron and Steel Institute of Japan*, 52(4):659-668, 2012.
- [8] A. Malik, G. Amberg, A. Borgenstam, and J. Agren, Effect of external loading on the martensitic transformation – A phase field study, *Acta Mater* 61:7868-7880, 2013.
- [9] I. Loginova, J. Odqvist, G. Amberg and J. Agren, The phase-field approach and solute drag modeling of the transition to massive gamma-to-alpha transformation in binary Fe-C alloys, *Acta Mater*, 51:1327-1339, 2003
- [10] A. Tahimi, F. Barbe, L. Taleb, R. Quey, A. Guillet, Evaluation of microstructure-based transformation plasticity models from experiments on 100C6 steel. *Comput. Mater Sci* 52:55–60, 2012.

- [11] J. Chen, B. Young, M. ASCE and B. Uy, Behavior of High Strength Structural Steel at Elevated Temperatures, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No.12, 2006. ISSN 0733-9445/2006/12-1948, 2006.
- [12] M. Knobloch, J. Pauli, M. Fontana, Influence of the strain-rate on the mechanical properties of mild carbon steel at elevated temperatures, *Materials and Design* 49:553-565, 2013.
- [13] L. Taleb and F. Sidoroff. A micromechanical modeling of the Greenwood-Johnson mechanism in transformation induced plasticity. *Int J Plasticity*, 19(10):1821 – 1842, 2003.
- [14] Franz C., Besserlich G., Schulze V., Müller H., and Lohse D. Influence of transformation plasticity on residual stresses and distortions due to the heat treatment of steels with different carbon contents. *J Phys IV France*, 120:481–488, 2004.
- [15] N. Cavallo. Contribution à la validation expérimentale de modèles décrivant la Z.A.T lors d'une opération de soudage. PhD thesis, INSA Lyon, France, 1998.
- [16] G. W. Greenwood and R. H. Johnson. The deformation of metals under small stresses during phase transformations. *The Royal Society*, 471, 1965.
- [17] T. OTSUKA, Modélisation micromécanique de la plasticité de transformation dans les aciers par homogénéisation numérique fondée sur la méthode FFT. PhD thesis, Université Paris 13, France, 2014.
- [18] F. Barbe, R. Quey, L. Taleb and E. Souza de Cursi, (2008) Numerical modeling of the plasticity induced during diffusive transformation. An ensemble averaging approach for the case of random arrays of nuclei. *Eur. J. Mech., A/Solids* 27:1121–1139, 2008.
- [19] H. Hoang, (2008) Modélisation numérique de la plasticité des transformations de phase diffusives à l'état solide. PhD thesis, INSA Rouen, France, 2008.
- [20] R. Quey, H. Hoang, F. Barbe, L. Taleb. Effect of the random spatial distribution of nuclei on the transformation plasticity in a diffusively transforming steel. *Int. J. Microstructure Materials Property*, 5:354-364, 2010.
- [21] F. Barbe and R. Quey, A numerical modelling of 3D polycrystal-to-polycrystal diffusive phase transformations involving crystal plasticity, *Int J Plasticity* 27:823--840, 2011.