

ÉTUDE NUMÉRIQUE DE L'EFFET DU CRITÈRE DE LA FORCE MÉCANIQUE DE CISAILLEMENT SUR L'AVANCEMENT D'UNE TRANSFORMATION MARTENSITIQUE DANS L'ACIER Fe-Ni-C

Mounir GACI¹, Salim MEZIANI², Atmane FOUATHIA³

Dans le présent travail nous analysons numériquement l'effet du critère de la force mécanique de cisaillement (FMC) sur le comportement d'un alliage métallique à transition de phase austénite – martensite, ou acier TRIP (Transformed Induced Plasticity). Ce critère, il donne l'ordre de succession de la formation des plaquettes de martensite (variante), en favorisant l'influence du phénomène de cisaillement dans l'avancement de ce type de transformation martensitique (mécanisme de Magee), en un mono grain. Un modèle implanté dans un code de calcul par éléments finis (ZEBULON) a été développé pour l'étude du comportement mécanique à l'échelle microscopique. Les résultats obtenus, montrent que la cinétique et la valeur de la TRIP finale obtenues sont en bonnes concordance avec les résultats expérimentaux.

In the present work we numerically analyze the effect of the shear mechanical force (SMF)criterion on the behavior of a metal alloy phase transition austenite - martensite steel or TRIP (Transformed Induced Plasticity). This criterion, it gives the order to succession of the formation of martensite plaquette, favoring the influence of shear phenomenon in the advancement of this type of martensitic transformation (Magee mechanism) into a single grain. A model implemented in a code of finite elements (ZEBULON) was developed for the study of the mechanical behavior at the microscopic scale. The results shows the kinetics and value of the final TRIP obtained are in good agreement with the experimental results.

Keywords: martensite, TRIP effect, phase transformation, behavior, shear mechanical force (SMF)

Symboles

$\delta\chi$: La force mécanique de cisaillement (FMC) ;

¹Ma., Laboratoire de Mécanique, Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie, e-mail: gaci.mounir@labomecanique-umc.org ; mounir.g2011@gmail.com

² Pr., Laboratoire de Mécanique, Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie, e-mail: salim.meziani@labomecanique-umc.org; meziani_salim@yahoo.fr

³ Dr., Laboratoire de Mécanique, Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie, e-mail: fouathiaa@yahoo.fr

σ_n , τ : représentent respectivement la contrainte normale et la contrainte de cisaillement dans le plan d'habitat agissant à l'interface de l'élément considéré. Ces contraintes sont calculées à partir de l'état des efforts locaux dans l'élément avant transformation ;

$\textcolor{brown}{Y}$: La fraction surfacique d'un élément triangulaire ;

$\textcolor{brown}{F}$: La fraction surfacique d'une plaquette.

ε_x^{el} : La déformation macroscopique élastique suivant la direction x, due au chargement externe.

ε_x^{pt} : La déformation plastique due à la transformation de phase.

ε_x^{pc} : La déformation plastique due au chargement externe (dans le cas où un pré-écrouissage de l'austénite).

ε_x^{tr} : La déformation de transformation dans la direction du chargement à la température considérée

1. Introduction

La modélisation thermomécanique et métallurgique des matériaux est très importantes du fait que les phénomènes couplés (thermique, mécanique et métallurgique) intéressent particulièrement les industriels afin d'améliorer les qualités

de leurs produits ainsi que les chercheurs pour une meilleure compréhension des phénomènes. Divers modèles sont proposés dans la littérature et qui rendent compte de l'influence de ces phénomènes sur le cycle de vie des matériaux (modèles de transformation de phase ou modèles de comportement mécanique du matériau multiphasé). On peut citer : Leblond et al. [1], [2], [3], [4], [5], [6], qui ont proposé des modèles analytiques permettant de prendre en compte tous les phénomènes mis en jeu lors du soudage ou du traitement thermique des aciers. En présence de contraintes même inférieures à la limite d'élasticité du matériau à la température considérée, on peut observer une déformation plastique qui se produit uniquement durant l'avancement de la transformation. Cette déformation irréversible est appelée Plasticité de transformation (TRIP) [7], [8].

Le mécanisme de Magee [9] quant à lui, rend compte de la plasticité de transformation qui s'opère durant la transformation martensitique. La martensite se crée sous forme de plaquettes orientées aléatoirement, à l'intérieur de la phase austénitique. Des contraintes de cisaillement naissent alors entre les deux phases à cause de la différence de leurs propriétés thermomécaniques. L'effet macroscopique de cet état de contrainte reste isotrope sauf si une contrainte externe est appliquée [9]. Dans ce cas, celle-ci va donner aux plaquettes de martensite une orientation privilégiée, ce qui engendre une déformation plastique macroscopique [10].

Beaucoup de modèles sont développés à l'échelle microscopique pour modéliser le comportement des matériaux durant une transformation martensitique, mais aucun de ces modèles n'est entièrement satisfaisant, dans le sens qu'ils ne tiennent compte que de quelques aspects de la réalité. La capacité

d'un modèle pour une bonne description de ce type de transformation, d'une manière plus ou moins satisfaisante, est liée généralement aux trois critères suivants [11] :

- Introduction de l'orientation des plaquettes de la martensite formée ;
- Considération de l'écoulement plastique dans le volume d'étude ;
- Détermination de la cinétique de transformation.

Nous remarquons d'après la littérature [12], que la plupart des modèles tiennent compte au maximum, de deux de ces critères, mais aucun modèle ne présente une modélisation complète avec les trois critères cités précédemment. Les deux modèles généralement les plus utilisés, sont des modèles en deux dimensions à l'échelle microscopique. Le premier a été proposé par Ganghoffer et Simonsson [11] et le deuxième, qui représente une amélioration de cette modélisation, a été développé dans le cadre de la thèse de Wen [13] et [14].

Dans ce travail, on présente une analyse numérique de l'évolution de la TRIP dans le cas d'une transformation martensitique à l'échelle du mono grain. On se base sur une approche micromécanique initier par Ganghoffer[11], sous un chargement de traction uniaxiale dans l'acier Fe-Ni-C. Nous proposons le critère de la force mécanique de cisaillement (FMC) qui donne l'ordre de succession dans le processus de formation des plaquettes de martensite (variante), pour voir son effet sur la cinétique et la valeur finale de la TRIP.

2. Phénomène de Plasticité de transformation

Une transformation de phases est fortement influencée par l'état de contraintes. L'application de contraintes même inférieures à la limite d'élasticité du matériau peut provoquer une déformation irréversible. On appelle plasticité de transformation ce phénomène et on note ϵ_{pt} la déformation irréversible correspondante. On distingue deux mécanismes pour expliquer ce phénomène : le mécanisme de Greenwood- Johnson [15] et celui de Magee [9]. L'importance relative de l'un ou de l'autre de ces mécanismes dépend de la transformation considérée et de l'acier étudié. Il est généralement admis que le mécanisme de Magee est présent dans les transformations martensitiques, tandis que le mécanisme de Greenwood Johnson est dominant pour les transformations par diffusion [15]. La figure.1 donne l'évolution de la plasticité de transformation selon un modèle numérique proposé initialement par Ganghoffer, utilisant l'élément triangulaire pour le maillage d'un mono grain, dans un acier FeNiC avec une contrainte de traction égale à 200 MPa.

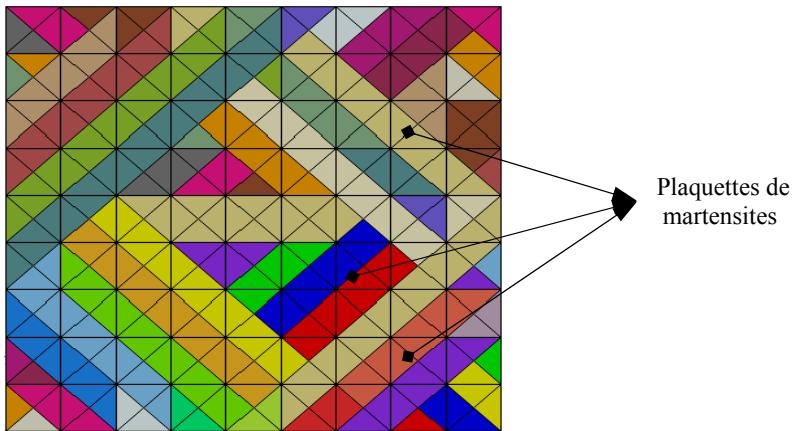


Fig. 1.a . la distribution des aiguilles courtes de martensite dans un mono grain [11].

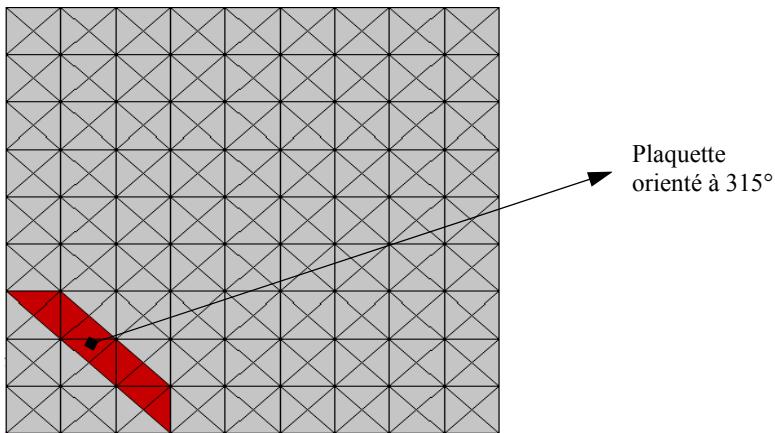


Fig. 1. b. plaque de martensite imposée au début de la transformation orienté à 315° [11].

3. Critère d'avancement de la transformation

Sous l'hypothèse des petites déformations, la force motrice mécanique maximale, pilotant la transformation, a été proposée initialement par Ganghoffer [11]. Elle représente en partie, le travail mécanique maximum consommé lors de la transformation (FMMMax). En tenant compte de l'effet d'orientation des plaquettes, cette hypothèse constitue un des points de discussion évoquées dans le cadre de la thèse de Wen [13], qui propose l'hypothèse de la Force Motrice mécanique Moyenne (FMMoy), qui représente la sommation des forces motrices de l'ensemble des éléments de la bande considérée, divisée par le nombre d'éléments. La plaquette qui se transforme est celle dont la force motrice

normalisée par le nombre d'éléments la constituant est la plus grande parmi toutes les plaquettes.

Dans l'objectif de contribuer à une amélioration des résultats de la TRIP dans l'acier Fe-Ni-C, on a utilisé le critère de la force mécanique de cisaillement (FMC). Ce critère repose sur les résultats et les analyses de plusieurs travaux déjà réalisés dans ce domaine et qui montrent que la transformation martensitique (transformation displacive), s'opère par un phénomène de cisaillement qui joue un grand rôle (mécanisme de Magee). Ce qui nous emmène à attribuer une influence plus au moins significante dans l'équation donnant l'ordre de transformation des aiguilles de martensite dans le grain (eq. 1).

$$\delta\chi = \sigma_n * Y + \tau * F \quad (1)$$

3.1. Calcul numérique de la déformation de la plasticité de transformation

Dans cette simulation, la déformation macroscopique totale moyenne ϵ_{pt} est évaluée à travers le déplacement des nœuds du bord du maillage suivant la direction (x) de la charge appliquée. Cette valeur de déformation représente la somme de quatre termes de déformation (eq. 2):

$$\epsilon_x^{total} = \epsilon_x^{el} + \epsilon_x^{tr} + \epsilon_x^{pc} + \epsilon_x^{pt} \quad (2)$$

Dans nos calculs, la plasticité de transformation est donnée par la formule suivante (eq. 3) [16], [17] :

$$\epsilon_x^{pt} = \epsilon_x^{total} - (\epsilon_x^{el} + \epsilon_x^{tr} + \epsilon_x^{pc}) \quad (3)$$

4. Discussion et analyse des Résultats

Pour valider le critère proposé, de la force mécanique de cisaillement, on a utilisé la même démarche adoptée par Ganghoffer [11], pour un grain formé de 64 aiguilles courtes. La simulation a été faite en utilisant successivement les critères de Wen, de Ganghoffer et celui de la force mécanique de cisaillement, en imposant une courte plaquette au début de la transformation, orientée suivant un angle de 315°.

La figure 2, présente les résultats obtenus expérimentalement par Gautier [18] et numériquement par Meftah [16].

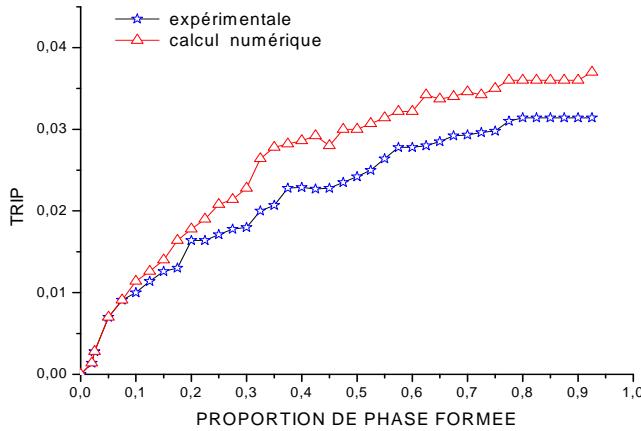


Fig. 2. Comparaison entre la plasticité de transformation obtenus par la simulation numérique et les résultats expérimentaux de Gautier [18] pour une transformation martensitique dans l'acier Fe-Ni-C sous une contrainte de traction égale à 250 MPa [16]

Les figures 3a÷c, montrent les résultats obtenus dans notre cas et utilisant successivement les critères de Wen, de la force mécanique de cisaillement et de Ganghoffer .

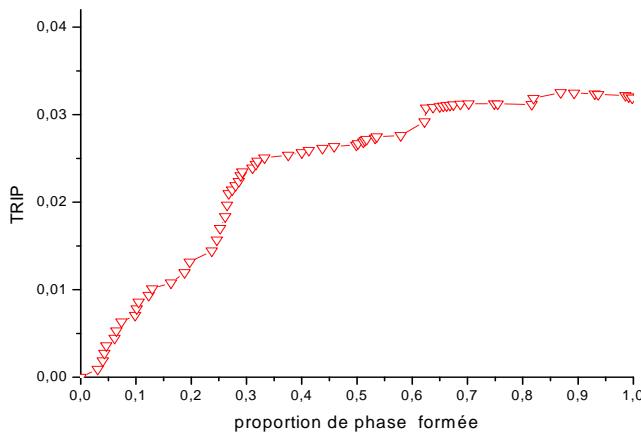


Fig. 3.a. Effet de la taille du maillage sur le TRIP pour une première courte imposée, orientées à 315°, sous une contrainte de traction égale à 250MPa (critère : FMMoy).

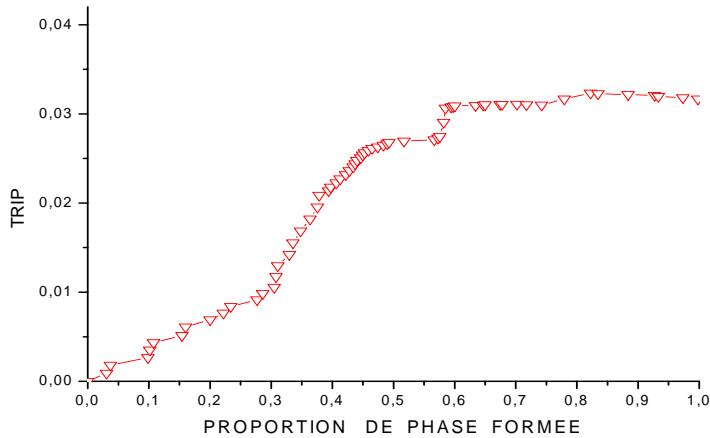


Fig. 3.b. Effet de la taille du maillage sur le TRIP pour une première courte imposée, orientées à 315° , sous une contrainte de traction égale 250MPa (critère : FMC).

On constate que la cinétique et la valeur de la TRIP finale obtenues selon Wen et le critère de la force mécanique de cisaillement présentent une bonne concordance avec les résultats de la figure 2. Par contre, ceux obtenus selon le critère de Ganghoffer (Fig. 3.c) donne une vitesse de transformation plus lente au début de la transformation et une valeur de la TRIP finale plus élevée par rapport à l'expérimental.

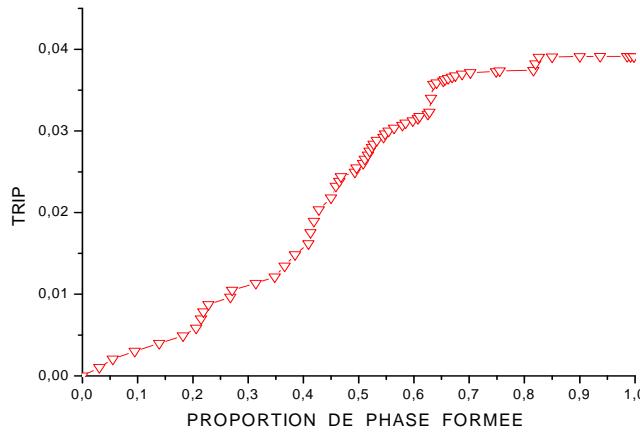


Fig. 3.c. Effet de la taille du maillage sur le TRIP pour une première courte imposée, orientées à 315° , sous une contrainte de traction égale à 250MPa (critère : FMMax).

Les figures 4a÷c représentent l'état de la contrainte équivalente au sens de Von mises, l'état de cisaillement interne et la contrainte normale, suivant l'axe de l'application de la charge, dans le cas d'une plaquette imposé au début de transformation et orientée à 315°.

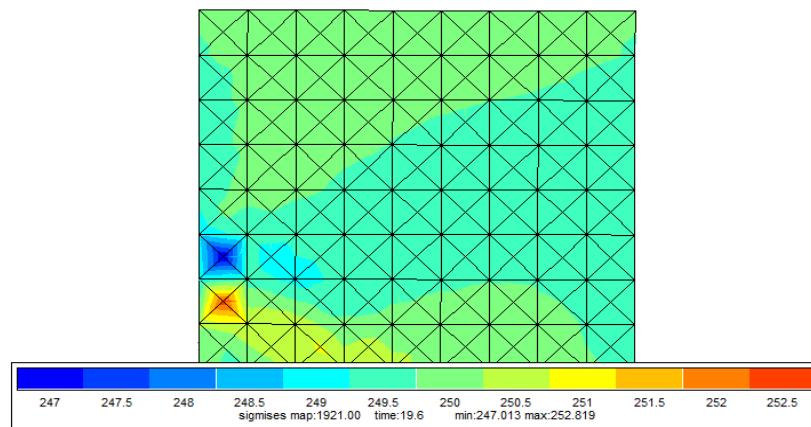


Fig. 4. a. Variation de l'état de contrainte équivalente au sens de Von mises suivant l'axe de l'application de la charge dans le cas d'une courte plaquette imposée au début de la transformation et orientée à 315°.

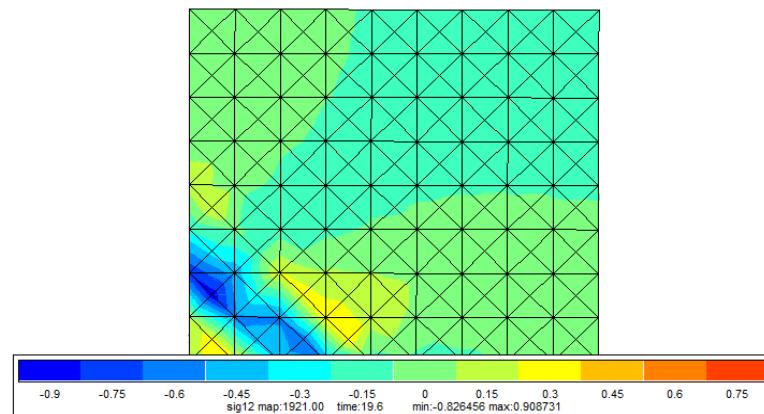


Fig. 4. b . Variation de l'état de contrainte du cisaillement interne, suivant l'axe de l'application de la charge dans le cas d'une courte plaquette imposée au début de la transformation et orientée à 315°.

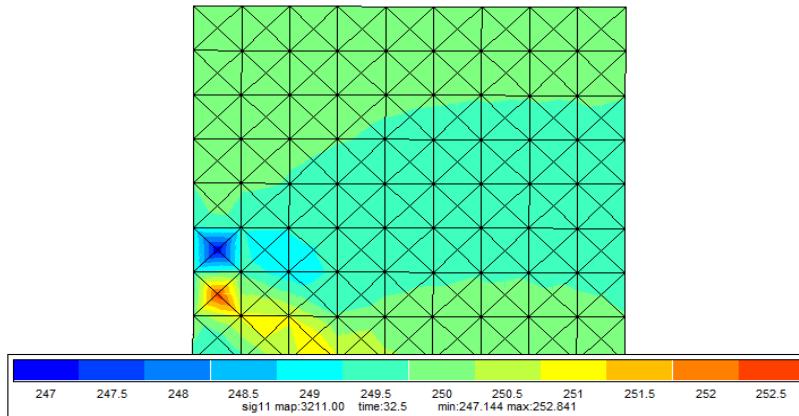


Fig. 4. c. Variation de l'état de contrainte normale, suivant l'axe de l'application de la charge dans le cas d'une courte plaquette imposée au début de la transformation et orientée à 315° .

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons utilisé un modèle micromécanique bidimensionnel permettant de simuler le phénomène de plasticité de transformation, dans une transformation martensitique de l'acier Fe-Ni-C sous une contrainte de traction égale à 250 MPa.

Pour mieux contribuer à l'amélioration des résultats concernant ce phénomène, on a proposé un critère basé sur de la force mécanique de cisaillement (FMC), qui favorisant l'effet de la contrainte de cisaillement dans la progression de formation des plaquettes de martensite à l'échelle du mono grain, dans le cas d'une courtes plaquette imposée au début de la transformation et orientée à 315° .

Les résultats des simulations réalisées, ont montré une bonne concordance de la cinétique et de la valeur de la TRIP à partir de 50% de la transformation. Pour le début de la formation des plaquettes de martensite, on constate une TRIP faible selon le critère FMC et une transformation des aiguilles les plus longues dans le grain, comparativement à celle donner par le critère de force motrice mécanique moyenne de Wen (FMMoy).

RÉFÉRENCES

- [1]. J.B Leblond, Mathematical modelling of transformation plasticity in steels II : coupling with strain hardening phenomena. International journal of plasticity, Vol.5, 573–591. 1989
- [2]. J.B Leblond, J Devaux, A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size. Acta Metallurgica, Vol.32, 137–146. 1984,

- [3]. *J.B Leblond, G Mottet, J.C Devaux*, A theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformation-I. Derivation of general relations. *J.Mech.Phys.Solids*, Vol.34, 395–409. 1986a,
- [4]. *J.B Leblond , G Mottet, J.C Devaux* , A theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformation-II. Study of classical plasticity for ideal-plastic phase. *J.Mech.Phys.Solids*, Vol.34, 411–432. 1986b,
- [5]. *J.B Leblond, J Devaux, J.C. Devaux*, Mathematical modelling of transformation plasticity in steels I : case of ideal-plastic phases. *International journal of plasticity*, Vol. 5, 551–572. 1989.
- [6]. NgocThuy TRINH, Modélisation du Comportement Thermomécanique et Métallurgique des Aciers. Thèse de doctorat l’École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, 2008,
- [7]. *D Cardinaux, Koen Van Reusel, Jean-Claude Gelin , Yvan Chastel M.*, Etude et modélisation numérique 3D par éléments finis d’un procédé de traitement thermique de tôles embouties après chauffage par induction : application à un renfort de pied central automobile, l’école nationale supérieure des mines de paris. 2008,
- [8]. *E Gautier*, Transformations perlitiques et martensitiques sous contrainte de traction des les aciers. Thèse de doctorat ès Sciences physiques, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1985, NP 176, 1985.
- [9]. *C L Magee*, Transformation kinetics, microplasticity and ageing of martensite in Fe-31-Ni, PhD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburg,1966,
- [10]. *B Amri*, effet d'hysteresis de la dilatation thermique sur les contraintes résiduelles dues au soudage. Thèse soutenue pour l'obtention de la maîtrise en génie mécanique, Montréal, Canada, 2008,
- [11]. *J F Ganghoffer, K Simonsson*, A micromechanical model of the martensitic transformation. Linkoping Institute of technology, 1998.
- [12]. *S Meftah*, Modélisation de la plasticité due à une transformation martensitique dans les aciers. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquée (INSA) de Rouen, France ,2007.
- [13]. *Y Wen*, Approche micromécanique et simulation numérique par éléments finis de la transformation martensitique sous contrainte ; thèse de doctorat . Institut National des sciences polytechnique de LORRAINE,120P.1997
- [14]. *Y Wen, S Denis, E Gautier*, Computer simulation of martensitic transformation under stress. supplément au J. de Physique III, V6, Colloque C1, 475.
- [15]. *G.W Greenwood, R.H Johnson*, the deformation of metals under small stresses during phase transformation. Proc. Roy. Soc. 283A, pp 403-422, 1965.
- [16]. *S Meftah., L. Taleb*, Contribution à la modélisation numérique des effets mécaniques des transformations métallurgiques dans les aciers. Thèse DEA INSA – ROUEN, France. 2003,
- [17]. *S Meftah, L Taleb, F Barbe , F Sidoroff*, Effet des paramètres numériques sur la modélisation du TRIP et son interaction avec la plasticité classique pour le cas d'une transformation martensitique. Colloque, JM'05, Alger .Algérie, 2006.
- [18]. *E Gautier, A Simon, G Beck*, Etude du comportement mécanique associé à la transformation martensitique d'alliages de type Fe-Ni-C sollicités en fluage ou en traction. 7th international conference on strength of metal and alloys (ICSMA 7), Montréal, Ed. Mc Queen, 12-16 août, p569-, ISBN0080316409. (1985),