

Modélisation de la plasticité de transformation dans un multi grain avec milieu environnant non uniforme

Mounir Gaci^{1*}, Salim Meziani², Atmane Fouathia³

^{1 2 3}Laboratoire de Mécanique

Département de Génie mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie. Université Frères Mentouri – Constantine 1. Campus Chaab Ersas, 25000 Constantine, Algérie

*auteur correspondant : mounir.g2011@gmail.com

Résumé -Ce papier présente les résultats d'une modélisation numérique de la plasticité de transformation dans l'acier Fe-Ni-C dans le cas d'une transformation martensitique, sous chargement mécanique de traction-compression biaxial. Nous nous intéressons à la Plasticité Induite par la Transformation (Transformation Induced Plasticity ou TRIP). La simulation numérique de la transformation martensitique à l'échelle de multi grain a été élaborée par modèle micromécanique bidimensionnel implanté dans un code de calcul par éléments finis (ZEBULON). L'étude porte sur l'influence des paramètres de calcul tels que le domaine de transformation qui est formé de cinq grains d'une géométrie quelconque (échelle multi grain) et les deux critères de transformation proposés, le critère du travail mécanique local (TML) et le critère de la force mécanique de cisaillement (FMC), qui favorisent l'influence du phénomène de glissement dans l'avancement de ce type de transformation (mécanisme de Magee). Les résultats obtenus montrent l'influence de la géométrie du grain, de l'état de contrainte et des critères proposés, sur les paramètres de la transformation, à savoir la cinétique, le sens d'écoulement plastique et la valeur du TRIP.

Mots Clés : Plasticité de Transformation, TRIP, Echelle multi-grain, FMC, TML, Transformation martensitique.

Nomenclature

n nombre d'éléments triangulaires constituant une plaquette de martensite formée

N Nombre total des éléments

F La fraction surfacique d'une plaquette

TML Travail mécanique local, j

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 l'élément, avant transformation, MPa

ϵ_{ii} Déformation normal dans le plan local de la plaquette en transformation

γ_{ij} Déformation tangentielle dans le plan local de la plaquette en transformation

$\delta\chi$ La force mécanique de cisaillement(FMC), N

\square La fraction surfacique d'un élément triangulaire

1. Introduction

Une transformation de phase se produit lorsque le matériau subit des sollicitations thermiques et/ou mécaniques spécifiques. La variation de la distance interatomique induite par ces sollicitations, conduit la structure cristalline à se réarranger en vue d'obtenir une forme

plus stable. Ce réarrangement peut se produire en fonction des sollicitations externes et de la texture initiale du réseau, suivant deux mécanismes: diffusif ou displacif. De ce fait, on distingue deux types de transformations, diffusives et displacives. Ces déformations irréversibles appelées TRIP, sont régis respectivement par deux mécanismes: mécanisme de Greenwood-Johnson (transformation avec changement de volume) [1], le mécanisme de Magee (les transformations martensitiques) [2], [3].

Les premiers travaux d'investigation sur ce phénomène n'ont commencé que dans les années 30, avec les travaux de Scheil et Thiele [4], Wasserman [5] et d'autres. Il a fallu attendre les années 60 et les travaux de Porter et Rosenthal [6] ou de De Jong et Rathenau [7] pour la mise en place de modèles. Le premier modèle proposé par Porter et Rosenthal [6] a été mis en place grâce à des essais sur des aciers et pour des transformations de type martensitique ou perlitique. Ce modèle prévoit une déformation plastique macroscopique proportionnelle à la contrainte et dirigée dans la direction de charge. La cinétique de l'écoulement plastique engendrée par ce mécanisme dans les aciers dépend de nombreux paramètres [8], tels que :

- *le matériau et la transformation de phase considérée ;
- *la valeur de la contrainte appliquée ;
- *l'avancement du changement de phase ;
- *le type de contrainte appliquée ;
- *l'écrouissage de la phase mère.

A la simulation de ce phénomène basée sur des modèles analytiques, vient s'ajouter la modélisation numérique initiée par Ganghoffer [9], puis d'autres modèles furent proposés par Wen et Idesman [10].

Dans ce travail, on présente une modélisation numérique d'une transformation complètement martensitique dans l'acier **Fe-Ni-C**, sous un chargement mécanique de traction-compression bi-axiale, suivant X et Y (150_150 MPa). Cette modélisation est une extension en multi-grains (cinq grains) de formes géométriques quelconques, avec un milieu environnant basé sur le modèle du mono-grain bidimensionnel de Ganghoffer [9]. Pour ce phénomène de TRIP et dans le but d'obtenir des explications sur l'aptitude des critères utilisés pour gérer l'avancement de ce type de transformation (martensitique), le critère mécanique (force mécanique de cisaillement FMC) et le celui du travail mécanique local (TML), ont été proposés et testés. Les résultats de ces deux critères, confrontés avec ceux obtenus par le critère de l'énergie de déformation élastique locale (EDEL) [11], montrent une légère différence dans la prédiction de la valeur de TRIP, le sens de l'écoulement plastique et la cinétique de la transformation.

2. Le phénomène de plasticité de transformation

Le phénomène de la plasticité de transformation, connu depuis le début du siècle dernier [12], est un phénomène dont la modélisation est toujours d'actualité. On prend comme exemple les études récentes de M. Coret [13] et S.P. Grostabussiat [14]. Lors d'une transformation de phase, l'application de sollicitations mécaniques très faibles, en dessous de la limite d'élasticité de la phase la plus molle, entraîne un écoulement plastique (Fig.1) [8].

Dans le cas d'un changement de phase, la différence de compacité entre phase mère et fille entraîne des déformations à l'échelle globale, que l'on qualifie de déformations métallurgiques [1], et de plus, pour la transformation martensitique par la formation de plaquettes à orientation préférentielles [2].

Vu L'importance relative à la plasticité de transformation, plusieurs modèles analytiques ont été proposés pour prédire les conséquences du changement structural, entre autre : Gautier, Mitter, Abrassart, Desalos, Leblond, Taleb - Sidoroff, et Fischer [15]. A l'échelle microscopique, les incompatibilités de déformation entre phase mère et phase fille créent des contraintes internes suffisantes pour entraîner une plastification locale de la phase fille et/ou de la phase mère. La présence d'une contrainte extérieure, même très faible, peut entraîner une déformation plastique macroscopique, due à l'orientation des déformations plastiques microscopiques, ce qu'on appel déformation de la plasticité de transformation (TRIP) [8]

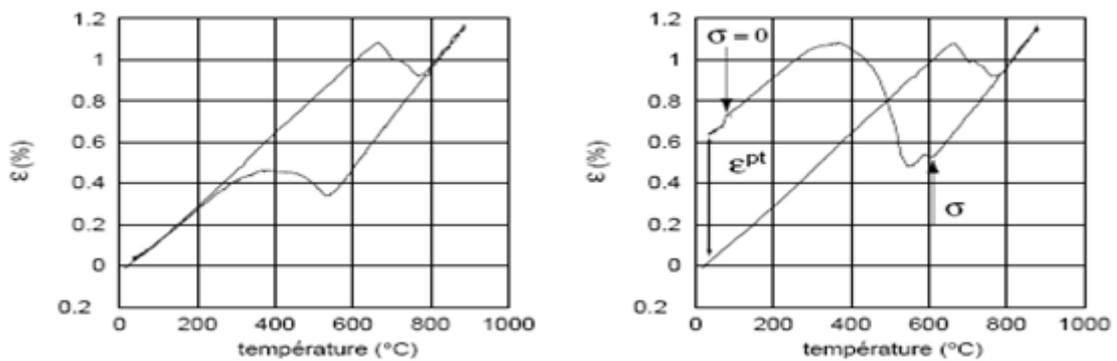


Figure 1: Mise en évidence de l'écoulement plastique ϵ_{pt} lors d'un essai de dilatomètre sous contrainte (TRIP)[13]

3. Géométrie du modèle

Le modèle utilisé dans cette étude, est un modèle micromécanique bidimensionnel en éléments finis. La géométrie de ce modèle représente les cinq grains sous la forme d'un carré, maillé avec 4056 éléments triangulaires, ce qui constituent un ensemble de 143 variantes réparties sur les cinq grains, avec un milieu environnant constitué de deux bandes (joint de grain) (Fig. 2).

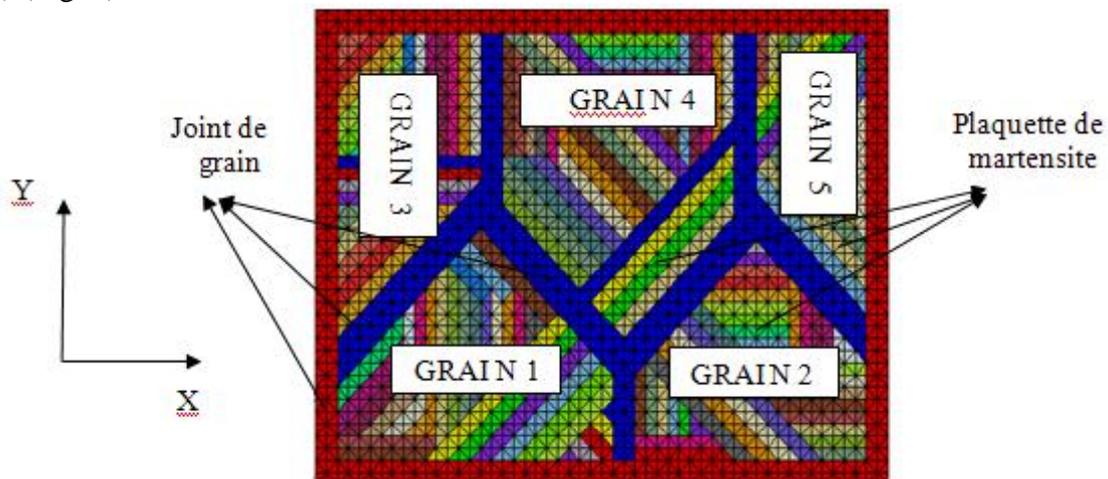


Figure 2 : Représentation du milieu environnant (joint de grain) et la distribution de courtes plaquettes dans un multi-grain en maillage triangulaire

Une plaquette de martensite (variante) est représentée par une bande d'éléments triangulaires. La formation d'une plaquette est arrêtée par la frontière du domaine d'étude ou bien par la présence d'autres plaquettes déjà formées. Le choix d'éléments finis triangulaires, permet de prendre en compte quatre directions d'orientations possibles, pour les plans d'habitats des variantes avec un angle de 45° entre eux (0°, 45°, 90° et 135°), ainsi que huit directions de cisaillement possibles, de telle façon que chaque direction soit associée à deux sens de cisaillement opposés (orientation directe et indirecte) [16].

3.1. Conditions aux limites

Le calcul est mené à l'échelle multi-grain, sous une contrainte mécanique bi-axiale de traction - compression (150, 150) MPa, appliquées respectivement suivant X et Y. La géométrie représente un grain formé de (26x19) briques. Une brique est composée de 4 éléments triangulaires unitaires et un joint de grain (milieu environnant) formé de deux bandes.

Les conditions aux limites sont données sur la figure 3. Les bords externes de l'ensemble du domaine restent droits et parallèles pendant toute la transformation. Par contre, nous n'avons imposé aucune condition sur les zones de contact, entre les grains et le milieu environnant (les frontières des grains) [11].

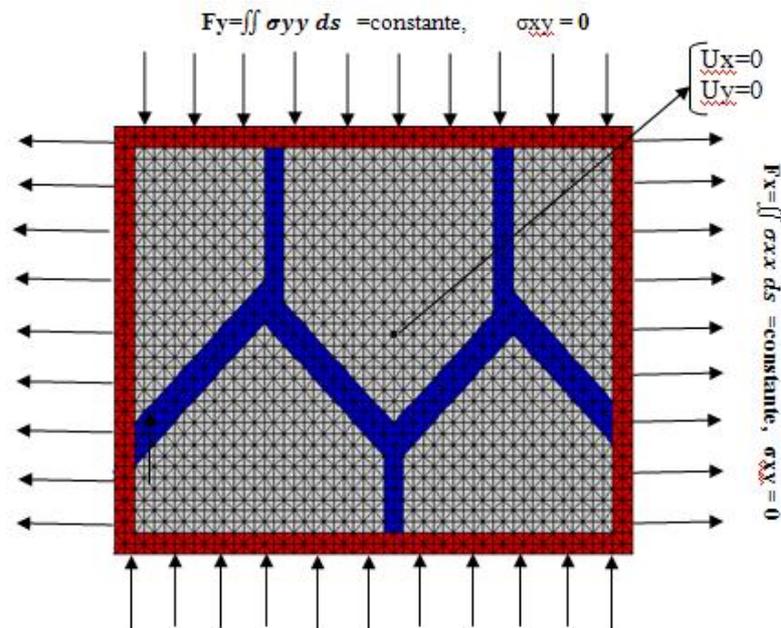


Figure 3: Schéma représentatif des conditions aux limites imposées sur le multi-grain

4. Critère d'avancement de la transformation martensitique

Sous l'hypothèse des petites déformations, la force motrice mécanique pilotant la transformation, a été proposée initialement par Ganghoffer [9]. Elle représente en partie, le travail mécanique consommé lors de la transformation. En tenant compte de l'effet d'orientation de la plaquette, de sa position et de sa longueur, on trouve que la plaquette qui se transforme, est celle dont la force motrice normalisée par le nombre d'éléments constituant le grain, est la plus grande parmi toutes les autres.

Dans l'objectif d'approcher qualitativement et quantitativement les résultats de la TRIP obtenus expérimentalement, Taleb et Meftah [11] ont utilisé le critère de l'énergie de déformation élastique locale (EDEL).

Dans ce travail, nous proposons d'utiliser un critère mécanique, la force mécanique de cisaillement (FMC). Celui-ci repose sur les résultats et les analyses de plusieurs travaux déjà réalisés dans ce domaine, et qui montrent que la transformation martensitique, qui est une transformation displacive, s'opère par un phénomène de cisaillement, appelé mécanisme de Magee. Ceci nous emmène à attribuer une influence plus au moins significative de l'effet de cisaillement dans l'équation donnant l'ordre de transformation des aiguilles de martensite dans le grain. Le critère mécanique est basé sur la force mécanique de cisaillement (FMC) et peut être écrit (eq.1):

$$\delta\chi = \sigma_n * \square + \tau * f \quad (1)$$

Vu l'insuffisance en qualité, des résultats de la TRIP obtenus avec l'identification de toutes les plaquettes de martensites, utilisant le critère de la force motrice mécanique (FMMmax et FMMmoy), nous introduisons une amélioration sur ce critère, qui consiste en un calcul du travail mécanique local (Tm local), basé sur l'approche de Ganghoffer [9], en utilisant la relation suivante (eq.2).

$$TML = \sum_{n=1}^{Net} ((\sigma_n * \epsilon_{ii} * \square) + (\tau * \gamma_{ij} * f)) \quad (2)$$

5. Analyse et discussion des résultats

Dans cette simulation numérique, une approche micromécanique est utilisée pour la prévision de la plasticité de transformation dans l'acier Fe-Ni-C, sous chargement mécanique bi-axial de traction-compression respectivement suivant les directions X et Y égal à (150_150) MPa. La valeur finale de la TRIP, la cinétique de transformation et le sens de l'écoulement plastique, ont été étudiés sous l'effet des paramètres pilotes pour ce type de transformation martensitique, qui sont : la taille du grain, la forme du grain, le milieu environnant et les critères d'avancements de la transformation.

Dans le but de voir l'influence du critère utilisé sur la cinétique de la transformation, le sens d'écoulement plastique et la valeur finale de la TRIP, on a mis à l'épreuve les critères suivants :

- Le critère de l'énergie de déformation élastique locale (EDEL) [21] ;
- et les deux critères proposés, la force mécanique de cisaillement (FMC) et le travail mécanique local (TML).

La valeur de la TRIP est le résultat d'une soustraction entre la déformation totale et la déformation thermique ϵ^{tr} , pour chaque plaquette constituant le domaine de transformation. La déformation totale est calculée par deux méthodes, la première au sens de Von mises et la seconde c'est la déformation équivalente maximale. Pour enrichir nos résultats, on a utilisé les deux déformations thermiques séparément, suivant X et Y (ϵ_x^{tr} , ϵ_y^{tr}).

On constate d'après toutes les figures (4a-b), (5a-b), (6a-b), (7a-b), (8a-b) que, les résultats de la TRIP obtenus en fonction de la déformation thermique suivant Y (ϵ_y^{tr}) montrent un écoulement plastique totalement positif durant la transformation martensitique. Ainsi, on trouve que la TRIP moyenne présente une cinétique de transformation de forme régulière.

La figure 4, représente l'évolution de la déformation de la plasticité de transformation (TRIP), obtenu avec le critère (EDEL) sous un chargement mécanique de traction-compression bi-axiale suivant X et Y, égal à (150, 150) MPa. On constate que les résultats obtenus en fonction de la déformation totale au sens de Von mises (Fig.4a) sont élevés comparativement à ceux calculés avec la déformation équivalente max (Fig.4b). On remarque aussi que, la valeur de la TRIP calculée en fonction de la déformation thermique suivant Y (ϵ_y^{tr}) montre un écoulement plastique positif, contrairement à celle obtenue avec la

déformation thermique suivant X (ϵ_x^{tr}), où on observe un changement de sens de l'écoulement du positif vers le négatif, à partir d'un taux d'avancement de la transformation égal à 37% et du négatif vers le positif au voisinage de 65%.

Dans les figures (5-a) et (6-a), on présente la variation de la TRIP, calculée avec le critère de la force mécanique de cisaillement (FMC sig11) croissante, en fonction respectivement de la déformation totale au sens de Von mises et la déformation équivalente maximale. On remarque que pour la TRIP calculée en fonction de la déformation thermique suivant X (ϵ_x^{tr}), le sens de l'écoulement plastique change de direction à un taux de 70% de la transformation. Dans les résultats de la TRIP obtenus en fonction de la déformation thermique (ϵ_y^{tr}), on constate un écoulement plastique positif durant toute la transformation.

Le même calcul a été reconduit avec (FMC sig11) décroissante (Fig. 5b et 6b). D'après ces résultats, on remarque que l'écoulement plastique a un double changement de sens, le premier se présente à 20% de la transformation et le deuxième a lieu à 45% du taux d'avancement de la transformation martensitique.

Les figures (7-a), (8-a) présentent les résultats de la TRIP, obtenus à l'aide du critère du travail mécanique local (TML sig11) croissant, en fonction respectivement de la déformation totale au sens de Von mises et la déformation équivalente maximale. On constate que la valeur de la TRIP calculée en fonction de la déformation équivalente maximale et (ϵ_x^{tr}), s'annule à un taux d'avancement de la transformation égale à 38% jusqu'au 82% (Fig. 8-a). Pour l'autre cas (Fig. 7-a), on observe un écoulement plastique qui change de sens à partir de 82% du taux d'avancement.

D'après les figures (7-b), (8-b), dans le cas des résultats de la TRIP obtenue en fonction de la déformation thermique suivant X (ϵ_x^{tr}) on remarque que le sens de l'écoulement plastique change de direction, du positif vers le négatif à 62% du taux d'avancement de la transformation et à 80% allant vers le positif jusqu'à l'achèvement de la formation des plaquettes de martensite dans le multi-grain.

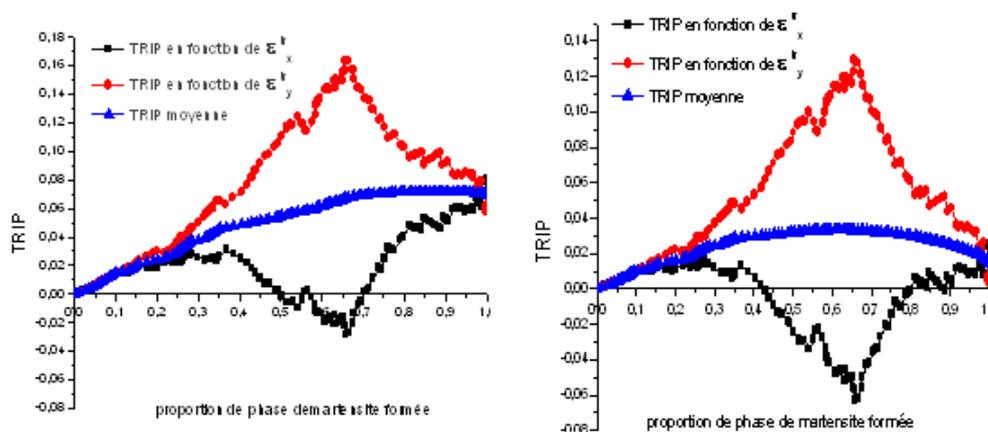


Figure 4 : Variation du TRIP d'une transformation martensitique dans l'acier Fe-Ni-C sous une contrainte bi-axiale de traction-compression (150, 150 MPa) à l'échelle multi-grain ,avec le critère (EDEL) :(a) Résultat TRIP en fonction de la déformation totale au sens de Von mises , (b) : résultat TRIP en fonction de la déformation totale équivalente max .

L'utilisation des critères de la force mécanique de cisaillement (FMC) et du travail mécanique local (TML), comme paramètres d'ordonnancement des aiguilles de martensite,

pendant la transformation martensitique dans le cas de chargement mécanique de traction compression bi-axiale (150,150 MPa), montrent que l'utilisation du critère (TML) en ordre décroissant, donnent des résultats mieux que ceux obtenus avec le critère de la force mécanique de cisaillement décroissante (FMC), du point de vu valeur de la TRIP, cinétique de transformation et sens de l'écoulement plastique, comparativement à celles obtenues selon le critère de l'énergie de déformation élastique locale (EDEL).

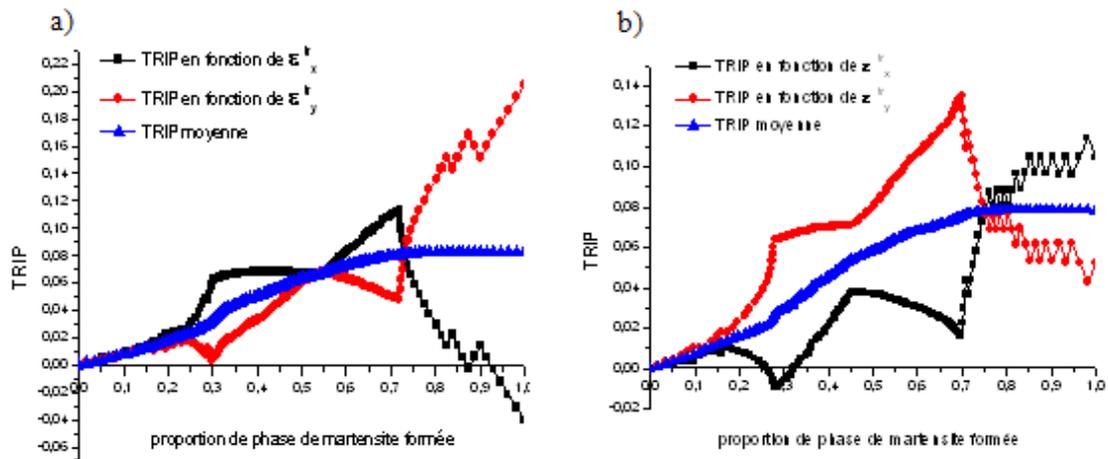


Figure 5 : Variation du TRIP d'une transformation martensitique dans l'acier Fe-Ni-C sous une contrainte bi-axiale de traction-compression (150, 150 MPa) à l'échelle multi-grain , en fonction de la déformation totale au sens de Von mises:(a) Résultat TRIP obtenu avec le critère (FMC sig11) croissante , (b) : Résultat TRIP obtenu avec le critère (FMC sig11) décroissante

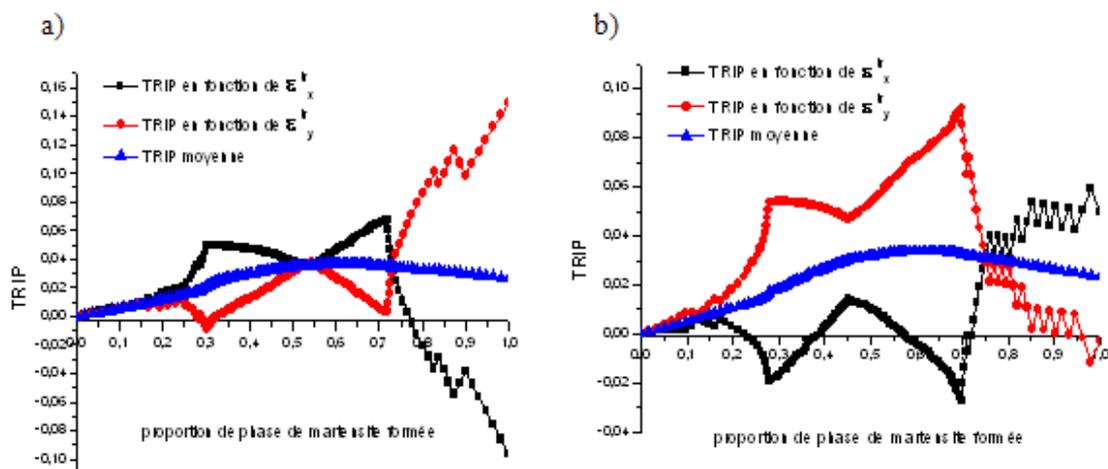


Figure 6 : Variation du TRIP d'une transformation martensitique dans l'acier Fe-Ni-C sous une contrainte bi-axiale de traction-compression (150, 150 MPa) à l'échelle multi-grain , en fonction de la déformation totale équivalente max:(a) Résultat TRIP obtenu avec le critère (FMC sig11) croissante , (b) : Résultat TRIP obtenu avec le critère (FMC sig11) décroissante.

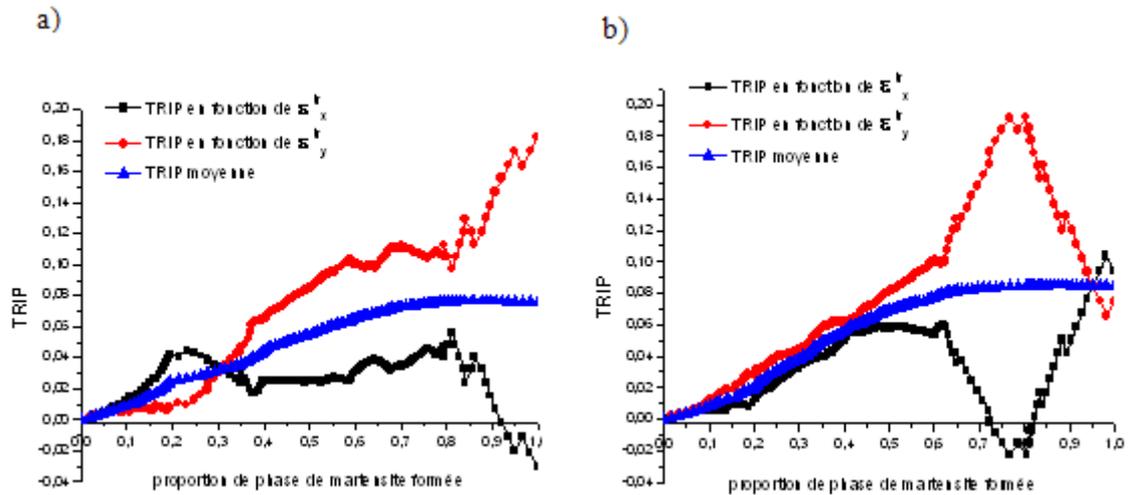


Figure 7 : Variation du TRIP d'une transformation martensitique dans l'acier Fe-Ni-C sous une contrainte bi-axiale de traction-compression (150, 150 MPa) à l'échelle multi-grain, en fonction de la déformation totale au sens de Von mises :(a) Résultat TRIP obtenu avec le critère (TML sig11) croissant, (b) : Résultat TRIP obtenu avec le critère (TML sig11) décroissant

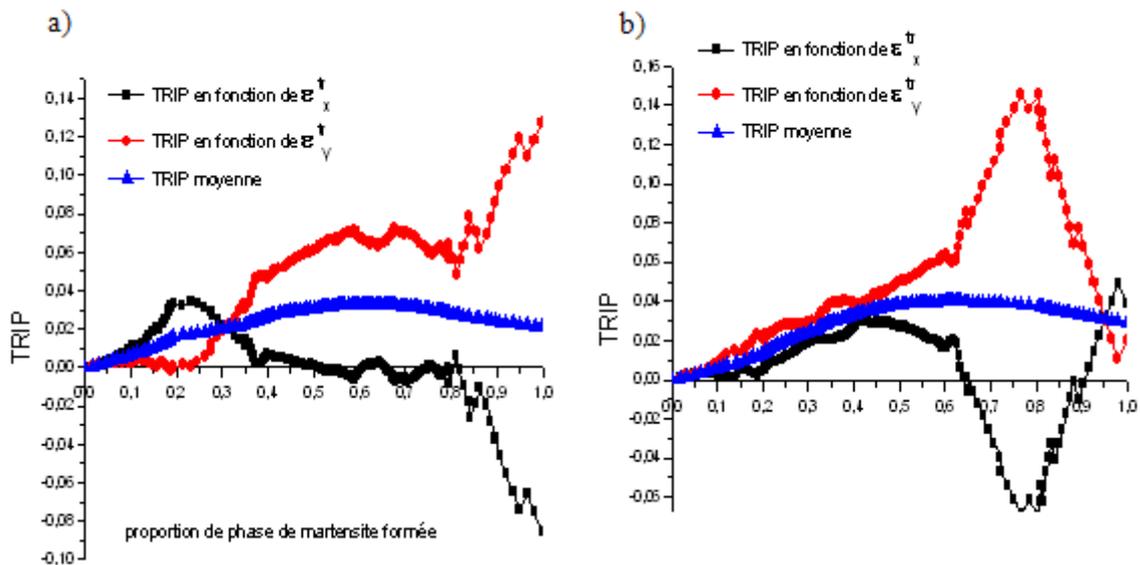


Figure 8 : Variation du TRIP d'une transformation martensitique dans l'acier Fe-Ni-C sous une contrainte bi-axiale de traction-compression (150, 150 MPa) à l'échelle multi-grain, en fonction de la déformation totale équivalente max :(a) Résultat TRIP obtenu avec le critère (TML sig11) croissant, (b) : Résultat TRIP obtenu avec le critère (TML sig11) décroissant

6. Conclusion

Dans l'objectif d'apporter une contribution à l'amélioration du modèle de comportement de matériaux à l'échelle microscopique dans le cas de transition de phase austénite/martensite, nous utilisons un modèle micromécanique bidimensionnel et proposons un domaine composé de cinq grains avec un milieu environnant (joint de grain). La simulation du phénomène de

plasticité de transformation dans l'acier Fe-Ni-C, dans le cas d'un chargement mécanique de traction-compression bi-axiale est étudiée.

Les résultats des simulations réalisées à l'aide du critère (TML) en ordre décroissant et utilisant le critère de la force mécanique de cisaillement (FMC), sont meilleurs du point de vue valeur de la TRIP, cinétique de transformation et sens de l'écoulement plastique, que ceux obtenus à l'aide du critère de l'énergie de déformation élastique locale (EDEL) [11].

Références

1. G W .Greenwood, R H. Johnson, The deformation of metals under small stresses during phase transformation. Proc. Roy. Soc. (1965)283A, 403-422
2. C L. Magee, Transformation kinetics, microplasticity and ageing of martensite in Fe-31-Ni. PhD thèse. (1966), Carnegie Mellon University, Pittsburg.
3. A. Tahimi, L. Taleb, F. Barbe, Plasticité induite par transformation de phase martensitique dans l'acier 35NCD16, INSA Rouen ,(2011), Groupe de Physique des Matériaux,.
4. E. Scheil, W.Thiele, Änderungen von mechanischen bei der austenit-martensit- umwandlung. Arch. Eisenhüttenwesen, (1937) 10 :477– 480.
5. G. Wassermann., (1937), Untersuchungen an einer eisen nickel-legierung über die verformbarkeit während der a-g umwandlung. Arch. Aisenhüttenwesen, 10:321–325,
6. L.F. Porter., P.C. Rosenthal., (1959), Effect of applied tensile stress on phase transformations in steel. Acta Metallurgica, 7:504–514.
7. M. De Jong, G.W. Rathenau, Mechanical properties of an ironcarbon alloy during allotropic transformations. Acta. Metallurgica, (1961), 9:714–720.
8. Roux, Préviation des contraintes résiduelles induites par le soudage TIG d'un acier martensitique (X10CrMoVNb9-1), thèse de doctorat, Laboratoire de Mécanique et Technologie ENS de Cachan / CNRS (UMR 8535) / Université Paris 6
9. J.Ganghoffer, F.K.Simonson, A micromechanical Model of The Martensitic Transformation. Mechanics of Materials, (1998), pages 125-144.
10. Y.H. Wen, Approche micromécanique et simulation numérique par éléments finis de la transformation martensitique sous contrainte. PhD thèses, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), (1997) France
11. S. Meftah, Modélisation de la plasticité due à une transformation martensitique dans un acier. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliqués (INSA) de Rouen, Laboratoire de Mécanique de Rouen (LMR), (2007).
12. A. Sauveur, what is steel? Another answer. Iron Age, (1924), 113:581–583.
13. M. Coret, Etude expérimentale et simulation de la plasticité de transformation et du comportement multi phase de l'acier de cuve 16MND5 sous chargement multiaxial anisotherme. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan,(2001).
14. S. P.Grostabussiat, L.Taleb, J.F. Jullien, Experimental results on classical plasticity of steels subjected to structural transformations. International Journal of Plasticity, (2004), 20:1371–1386.
15. N. Cavallo, Contribution à la validation expérimentale de modèles décrivant la Z.A.T lors d'une opération de soudage. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, (1998).
16. J.F.Ganghoffer, S. Denis, E.Gautier, A.Simon, K. Simonsson, S.Sjöström, Micromechanical simulation of a martensitic transformation by finite elements. Journal de Physique (1991b), IV, V. 1, pp. 77–82.