

Plasticité induite par transformation de phase martensitique dans l'acier 35NCD16

A. Tahimi, L. Taleb, F. Barbe

INSA Rouen, Groupe de Physique des Matériaux, CNRS UMR 6634, 76800 St Etienne du Rouvray, France

Résumé :

Cette étude porte sur la plasticité des aciers au cours d'une transformation de phase martensitique. Nous nous intéressons à la Plasticité Induite par la Transformation (Transformation Induced Plasticity ou TRIP), dans l'acier 35NCD16. Différents types d'essais ont été réalisés pour mettre en évidence ce phénomène sous diverses conditions de chargement uniaxial en cours de transformation (constant, linéaire croissant, linéaire décroissant...). En effet, classiquement les essais de TRIP sont réalisés sous un chargement constant durant toute la transformation ce qui n'est pas forcément représentatif des conditions de sollicitations réelles dans les structures industrielles. Les prédictions des modèles de Leblond (1989) et de Taleb et Sidoroff (2003) pour ces essais feront l'objet d'une discussion.

Abstract:

This study focuses on the plasticity of steels during a Martensitic phase transformation. We are interested here by the Transformation Induced Plasticity or TRIP in 35NCD16 steel. Different types of tests were conducted to highlight the phenomenon in various conditions of loading during the transformation (constant, linear increasing, linear decreasing loading ...). Indeed, classically, TRIP tests are performed under a constant load throughout the transformation which is not necessarily representative of real conditions of stress in industrial structures. The predictions of Leblond (1989) and Taleb and Sidoroff (2003) for these tests will be discussed.

Mots clefs: plasticité, TRIP, chargements variables, transformation martensitique.

1 Introduction

La plasticité de transformation (en anglais Transformation Induced Plasticity ou TRIP) est la déformation permanente constatée dans les aciers subissant une transformation métallurgique sous une charge mécanique inférieure à la limite d'élasticité de la phase la moins dure. Il faut faire appel à des modèles dédiés pour la prédire. Des modèles existants, celui de Leblond [1] et son extension proposée par Taleb et Sidoroff [2] sont particulièrement intéressants car ils fournissent des lois d'évolution du taux de TRIP en fonction de la fraction volumique de phase formée, lois qui peuvent être intégrées à des logiciels de calcul de structure pour la prédiction des conséquences d'interactions mécanique-thermique-métallurgie. Alors que de nombreux travaux ont montré le potentiel de ces modèles à prédire le TRIP pour des chargements uniaxiaux constants [2,3], peu ont été consacrés à des chargements variables au cours de la transformation. C'est l'objet du présent travail que de mener une évaluation sur un tel cas de chargement uniaxial, en traction pour le moment, pour la transformation martensitique d'un acier 35NCD16.

2 Essais de plasticité de transformation sur l'acier 35NCD16

Afin de calculer le TRIP obtenu expérimentalement, nous procédons comme suit,

- Un essai de dilatométrie libre : l'éprouvette est chauffée jusqu'à austénitisation complète puis refroidie rapidement afin de produire la martensite. Ceci fournit la courbe de la FIG. 1 à partir de laquelle on déduit la déformation macroscopique thermométallurgique et les dilatations thermiques de chaque phase.

- Un essai de TRIP : le même cycle thermique est appliqué ; tel que cela est présenté sur la FIG. 2, juste avant la transformation martensitique, l'éprouvette est soumise à une charge mécanique inférieure à la limite d'élasticité de l'austénite, qui reste constante (essai TRIP classique) ou varie avec le temps (essai de TRIP avec chargements variables). Cet essai fournit la déformation totale en fonction de la température.

- Le TRIP est déduit par la relation suivante,

$$\text{TRIP} = \text{Déformation Totale} - \text{Déformation Thermométallurgique} - \text{Déformation Élastique}$$

- La fraction de martensite formée, portée sur la FIG. 3, est calculée par la relation suivante [2],

$$Z(T) = (\varepsilon^{\text{thm}} - \varepsilon_{\gamma}^{\text{th}}) / (\varepsilon_{\alpha}^{\text{th}} - \varepsilon_{\gamma}^{\text{th}}) \quad (1)$$

ε^{thm} Déformation thermométallurgique.

$\varepsilon_{\alpha}^{\text{th}}$ et $\varepsilon_{\gamma}^{\text{th}}$ Dilatations thermiques de l'austénite et de la martensite respectivement.

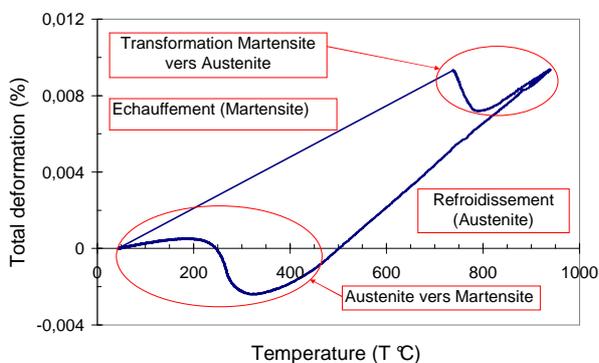


FIG. 1 – Dilatométrie libre.

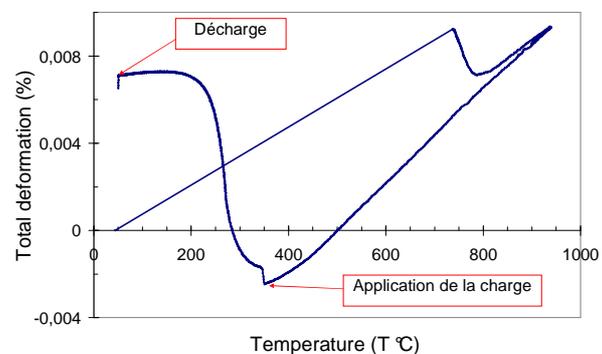


FIG. 2 – Essai de TRIP classique.

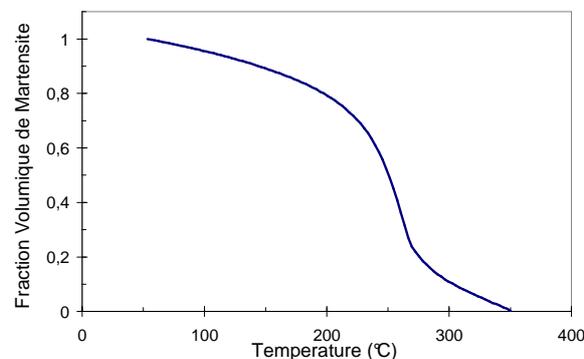


FIG. 3 – Evolution de la fraction volumique de martensite en fonction de température.

Les chargements mécaniques décrits par la FIG. 4 consistent à faire varier la charge de contrainte en traction au cours de la transformation tout en maintenant, pour chaque essai, la même valeur maximale de 118 MPa: chargement constant (a), chargements décroissants (b-f), chargement croissant (g). Les résultats de TRIP en fonction de la fraction volumique de phase formée sont donnés sur la FIG. 5. Conformément aux attentes, la plasticité est d'autant plus élevée que la charge s'applique *longtemps* sur la phase parente, celle dont la limite d'élasticité est la plus faible et qui est usuellement considérée comme seule originaire du TRIP : le TRIP maximal est obtenu pour le chargement constant ; le TRIP minimal est obtenu pour le chargement décroissant le plus rapidement, avec une valeur qui cesse d'évoluer dès lors que la charge s'annule.

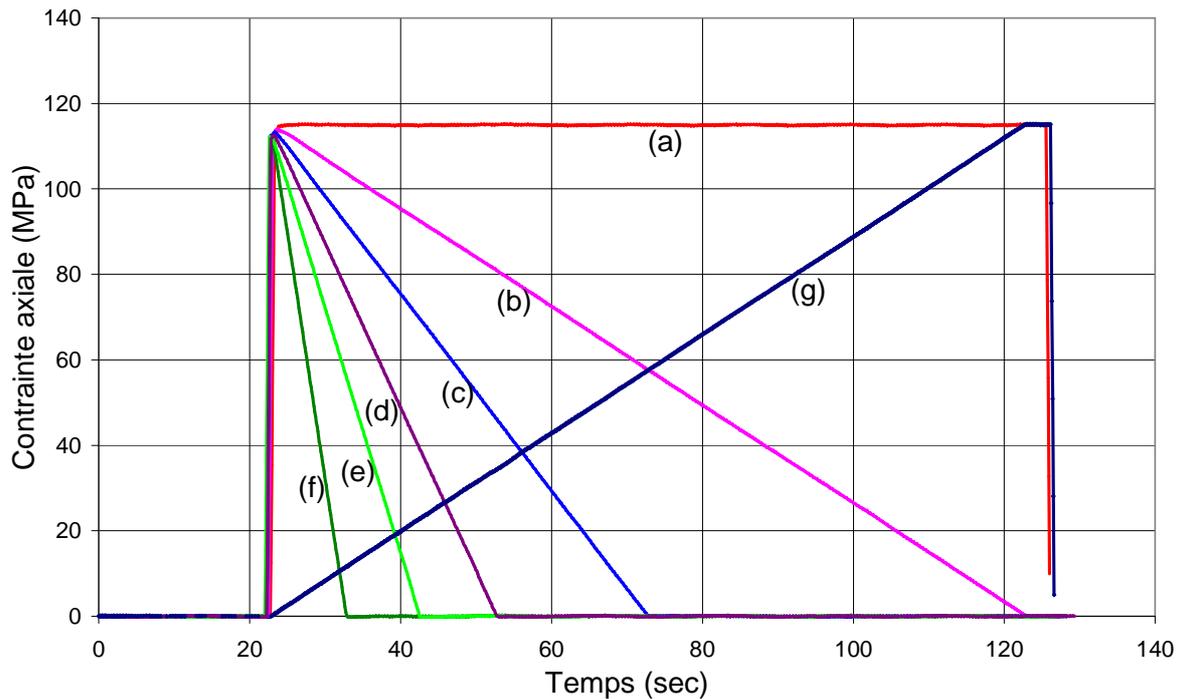


FIG. 4 – Variation de la contrainte de traction en fonction du temps. Essais : (a), (b), (c), (d), (e), (f) et (g).

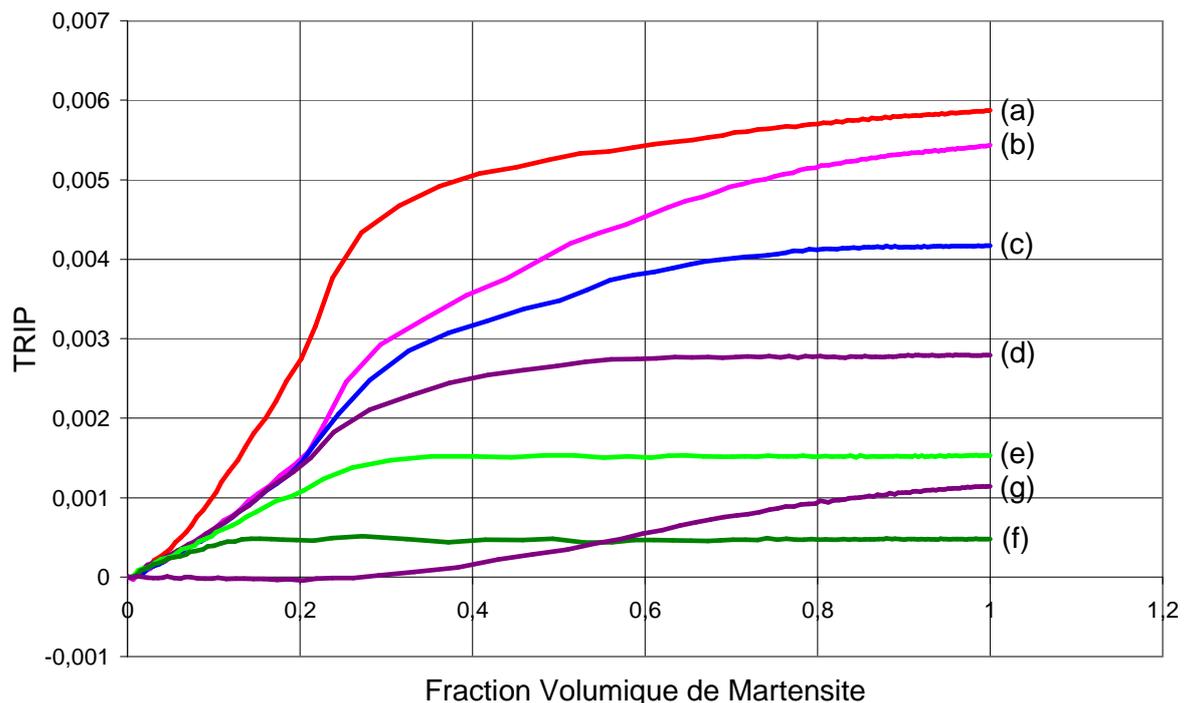


FIG. 5 – Evolution de la plasticité de transformation en fonction de la fraction volumique de martensite dans l'acier 35NCD16. Essais : (a), (b), (c), (d), (e), (f) et (g).

3 Comparaison entre modélisations analytiques et expérience

3.1 Modèle de Leblond [1]

Ce modèle est obtenu par une approche théorique d'analyse microscopique de la déformation plastique dans les aciers subissant une transformation de phases solide-solide. Pour cela, il a considéré une sphère d'austénite dans laquelle la phase produite se développe sous forme sphérique. Il a supposé que l'austénite est complètement plastique et que les efforts de compression de l'austénite sur la phase produite sont

négligeables. Les deux phases suivent un comportement parfaitement plastique et obéissent au critère de Von Mises. L'expression suivante du taux de TRIP est obtenue :

$$\dot{\epsilon}^{pt} = \begin{cases} 0 & z \leq 0,003 \\ \left[\left(\frac{-2\Delta\epsilon_{12}}{\sigma_1^y} \right) \ln(z) \dot{z} S \right] & z > 0,003 \end{cases} \quad (2)$$

$\dot{\epsilon}^{pt}$ Taux de plasticité de transformation ; z Fraction de martensite formée ; S Tenseur déviateur des contraintes appliquées ; $\Delta\epsilon_{12}$ Différence de déformation thermique entre les deux phases ; σ_1^y Limite d'élasticité conventionnelle de l'austénite.

3.2 Modèle de Taleb et Sidoroff [2]

En se basant sur le modèle présenté ci-dessus, Taleb et Sidoroff [2] proposent de revisiter les hypothèses adoptées par Leblond. Ils supposent que les déformations élastiques dans l'austénite ne sont pas négligeables devant les déformations plastiques. En effet, la sphère occupée par l'austénite se partage en deux zones : une coquille externe avec un comportement élastique qui englobe une coquille interne complètement plastifiée ; la frontière entre les deux zones évolue au cours de transformation. D'autre part, l'effet des efforts de compression de l'austénite sur la phase produite est pris en compte. Ce modèle permet la description du comportement au début de la transformation ce qui n'est pas le cas du modèle de Leblond.

$$\dot{\epsilon}^{pt} = \begin{cases} \left[\left(\frac{-2\Delta\epsilon_{12}}{\sigma_1^y} \right) \ln(z_1) \dot{z} S \right] & z \leq z_1 \\ \left[\left(\frac{-2\Delta\epsilon_{12}}{\sigma_1^y} \right) \ln(z) \dot{z} S \right] & z > z_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$z_1 = \frac{\sigma_1^y}{2\Delta\epsilon_{12}} \cdot \frac{4\mu + 3k}{9k\mu} ; \quad k \text{ Module de compressibilité élastique ; } \mu \text{ Module de cisaillement.}$$

3.3 Comparaisons et analyses

Les prédictions des modèles analytiques cités ci-dessus pour les différents types de chargements sont présentées afin de comparer la pertinence de ces modèles. Les paramètres d'écrouissage de l'austénite et de la martensite ont été tirés des travaux de S. Meftah [4]. Pour l'essai à chargement constant (a) ainsi que pour des essais à décroissance faible (b-c), les prédictions s'accordent bien aux observations et il est difficile de discriminer le potentiel de prédictibilité d'un modèle par rapport à l'autre. Mais cet accord se dégrade d'autant plus que la décroissance de la charge est rapide (d-f), avec une surestimation systématique des deux modèles, plus importante pour le modèle de Leblond que pour celui de Taleb et Sidoroff. Il apparaît donc que l'extension apportée dans le modèle de Taleb et Sidoroff concernant la plasticité au début de la transformation (eq. 2-3) contribue à améliorer le caractère prédictif. Pour le cas de charge croissante, essai (g), les modèles fournissent une même sous-évaluation du TRIP. Les différences importantes qui subsistent entre expérience et modélisation sont à lier à l'une ou l'autre des hypothèses franches adoptées : pas de plasticité dans la phase produite, TRIP déduit d'un mécanisme diffusif (l'apparition de la phase produite sous la forme de plaquettes fortement cisillées n'est pas pris en compte) ...

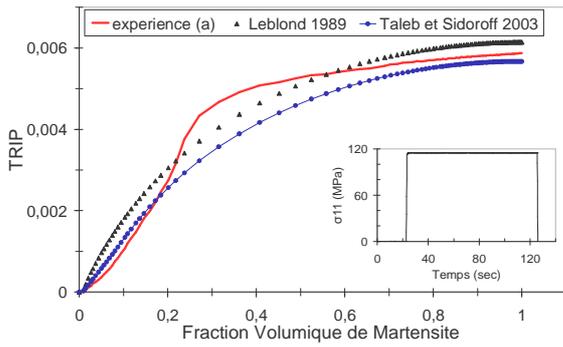


FIG. 6.1 – Essai (a)

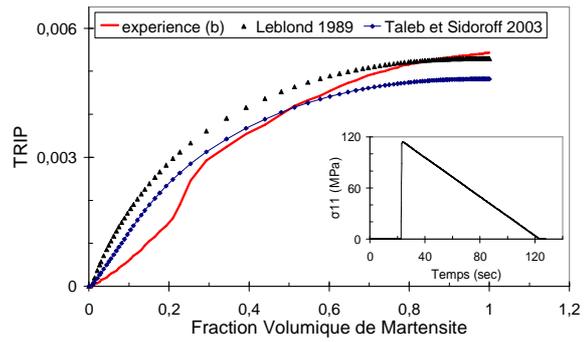


FIG. 6.2 – Essai (b)

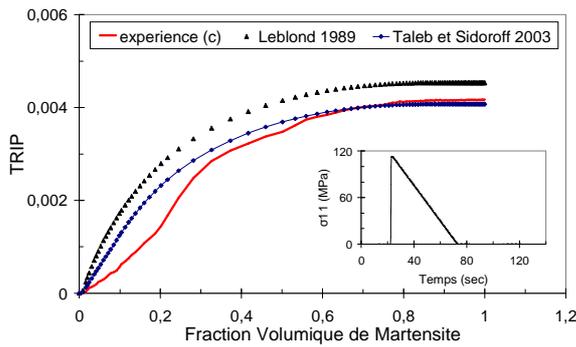


FIG. 6.3 – Essai (c)

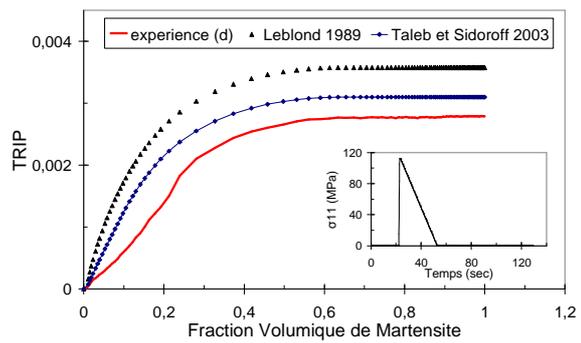


FIG. 6.4 – Essai (d)

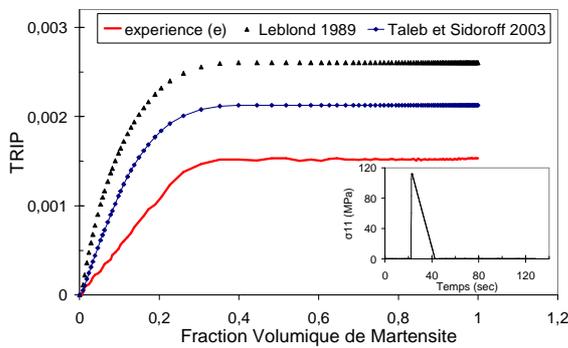


FIG. 6.5 – Essai (e)

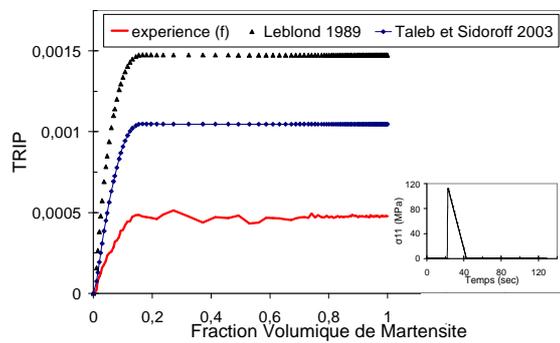


FIG. 6.6 – Essai (f)

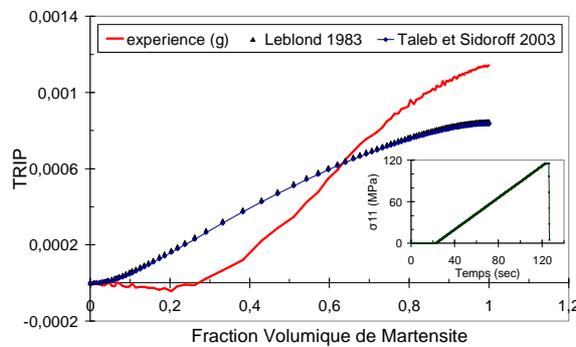


FIG. 6.7 – Essai (g)

FIG. 6 – Plasticité de transformation en fonction de la fraction volumique de martensite dans l'acier 35NCD16. Comparaison entre l'expérience et les modèles de Leblond [1] et de Taleb et Sidoroff [2]. Essais : (a), (b), (c), (d), (e), (f) et (g).

4 Conclusion et perspectives

Ce travail porte sur une évaluation de deux modèles analytiques de prédiction du TRIP basés sur le mécanisme de Greenwood-Johnson, pour des chargements uniaxiaux variables au cours de la transformation martensitique. Bien que ces modèles ne tiennent compte que d'un caractère diffusif dans les interactions entre phases, ils peuvent s'avérer prédictifs pour des transformations martensitiques, telles que celle étudiée ici. Ceci concerne en particulier le cas où la charge reste constante ou décroît lentement au cours de la transformation. Le fait d'augmenter la rapidité de la décroissance de la charge permet de mettre en évidence une sur-estimation systématique de la modélisation en début de transformation. Ces premiers instants de la transformation constituent donc la plage de transformation pour laquelle d'importantes améliorations pourraient être apportées à la modélisation, en complément de celles déjà introduites dans le modèle de Taleb et Sidoroff. Le cas d'un chargement croissant pourrait laisser croire que la phase produite, elle aussi apporte une contribution au TRIP vu que le TRIP expérimental continue à augmenter lors même que la fraction volumique d'austénite devient infime. Il convient malgré tout de rester prudent car la quantité de TRIP final reste petite pour ce cas de chargement. De nouveaux essais sous chargement variables, non nécessairement monotones, ainsi que des simulations numériques basées sur le mécanisme de Magee [5] nous fourniront des éléments importants pour mener ces réflexions.

Références

- [1] J. B. Leblond, J. Devaux, J. C. Devaux, Mathematical modelling of transformation plasticity in steels. I: Case of ideal-plastic phases, *Int J Plasticity* 5, 551-572, 1989.
- [2] L. Taleb, and F. Sidoroff, A micromechanical modelling of the Greenwood-Johnson mechanism in transformation induced plasticity, *Int J Plasticity* 19, 1821-1842, 2003.
- [3] M. Coret, S. Calloch and A. Combescure, Experimental study of the phase transformation plasticity of 16MND5 low carbon steel under multiaxial loading. *Int J Plasticity* 18, 1707-1727, 2002.
- [4] S. Meftah, Modélisation de la plasticité due à une transformation martensitique dans un acier, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Rouen, 149 P, Octobre 2007.
- [5] S. Meftah, F. Barbe, L.Taleb and F. Sidoroff. Parametric numerical simulations of TRIP and its interaction with classical plasticity in martensitic transformation. *Eur J Mech A/Solids* 26, 688-700, 2007.