

# Résistance à l'endommagement d'alliages de titane transformables par déformation : de l'échelle macroscopique à l'échelle nanométrique

Chloé VARENNE<sup>a,b</sup>, Frédéric PRIMA<sup>b</sup>, Jacques BESSON<sup>a</sup>, Cédrik BROZEK<sup>b</sup>, Julie BOURGON<sup>c</sup>, Anne-Françoise GOURGUES<sup>a</sup>

a. MINES ParisTech, Centre des Matériaux, UMR CNRS 7633, PSL Université, BP 87, 91003 EVRY CEDEX ; e-mail : prenom.nom@mines-paristech.fr

b. Chimie ParisTech, Institut de Recherche de Chimie Paris, IRCP, Equipe de Métallurgie Structurale, UMR CNRS 8247, PSL Université, 11 rue Curie, 75005 PARIS, France ; e-mail : prenom.nom@chimieparistech.psl.eu

c. MCMC-ICMPE, UMR 7182 CNRS - Université Paris-Est Créteil, 2-8 rue Henri Dunant, 94320 Thiais, France ; e-mail : bourgon@icmpe.cnrs.fr

## Résumé

La réalisation d'essais mécaniques statiques et dynamiques et leur comparaison sur des alliages de titane transformables par déformation, l'un TRIP/TWIP, l'autre uniquement TWIP (**TR**ansformation **I**nduced **P**lasticity et/ou **TW**inning **I**nduced **P**lasticity) couplées à des analyses microstructurales à l'échelle macroscopique, microscopique mais aussi nanométrique a permis de mettre en évidence les différents mécanismes de déformation activés suivant la sollicitation appliquée et de dégager quelques pistes de compréhension de l'importante résistance à l'endommagement de cette famille d'alliages de titane.

**Mots clés** : Alliages de titane, écrouissage, maclage mécanique, rupture ductile, transformation de phases.

## 1. Introduction

Les alliages de titane  $\beta$  conventionnels présentent une ductilité (environ 15 %) et un écrouissage (environ 80 MPa) limitants pour des applications de structure. Cependant, les derniers progrès sur les aciers, à savoir la plasticité induite par transformation de phase (TRIP) et/ou par maclage (TWIP) a permis une amélioration des propriétés par effets composite et Hall-Petch dynamiques. Une transposition aux alliages de titane a permis le développement d'alliages transformables par déformation, aux propriétés nettement améliorées par rapport aux alliages de titane conventionnels [1]. Une approche semi-empirique a été proposée pour la conception de ces nouveaux alliages, mettant en relation chimie des alliages et mécanismes de déformation et mise en application sur des alliages binaires, ternaires et quaternaires [2].

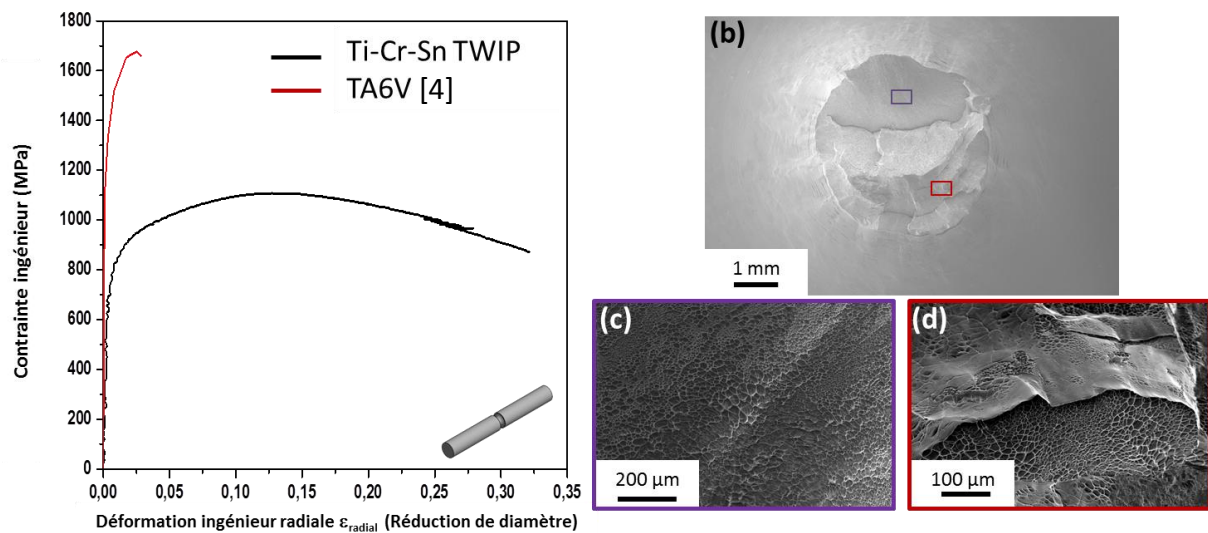
Si les perspectives sur ces alliages restent nombreuses, les questions encore posées par le comportement de ces alliages le sont aussi également. Ainsi, nous nous attachons ici à comprendre, à différentes échelles, les mécanismes de déformation et de résistance à l'endommagement que présentent ces alliages face à des sollicitations variées [3]. Aussi, le présent objectif est de pouvoir évaluer le rôle respectif des effets TRIP et TWIP sur la résistance à l'endommagement afin d'établir

un critère de conception d'alliages TRIP et/ou TWIP plus robuste, pour une résistance à l'endommagement optimale.

## 2. Essais mécaniques et analyses microstructurales

### 2.1 Essais mécaniques

En se concentrant sur la famille d'alliages Ti-Cr-Sn, présentant les effets TRIP et/ou TWIP, le lien entre évolution microstructurale lors de la déformation et mécanisme de rupture est approfondi par la réalisation de divers essais mécaniques (Fig. 1). En faisant varier les conditions de sollicitation, notamment le taux de triaxialité des contraintes, le paramètre de Lode et la direction de prélèvement, l'évolution de la résistance à la rupture ductile est explorée dans un domaine de sollicitation plus large que celui actuellement connu (traction sur éprouvettes plates, résilience Charpy et éprouvettes de ténacité, à température ambiante).



**Figure 1.** (a) Comparaison de l'évolution de la réduction de diamètre en fonction de la contrainte appliquée lors d'un essai de traction sur éprouvette entaillée NT4 (représentation 3D en insert) ; (b) Fractographie à faible grossissement au MEB d'une éprouvette entaillée NT4 et mise en évidence de deux types de faciès : (c) cupules classiques et (d) « terrasses »

Ces essais préliminaires ont permis de mettre en évidence de meilleures propriétés mécaniques (ductilité, écrouissage) pour ces alliages TRIP/TWIP par rapport aux alliages de titane conventionnels (ex : TA6V). On peut également attester de l'importante résistance à la localisation de la déformation de cette famille d'alliage en calculant, à partir de la déformation radiale ( $\epsilon_{radial}$ ), une « déformation vraie à rupture » ( $\epsilon_{rupture}$ ) par une loi de conservation de volume :

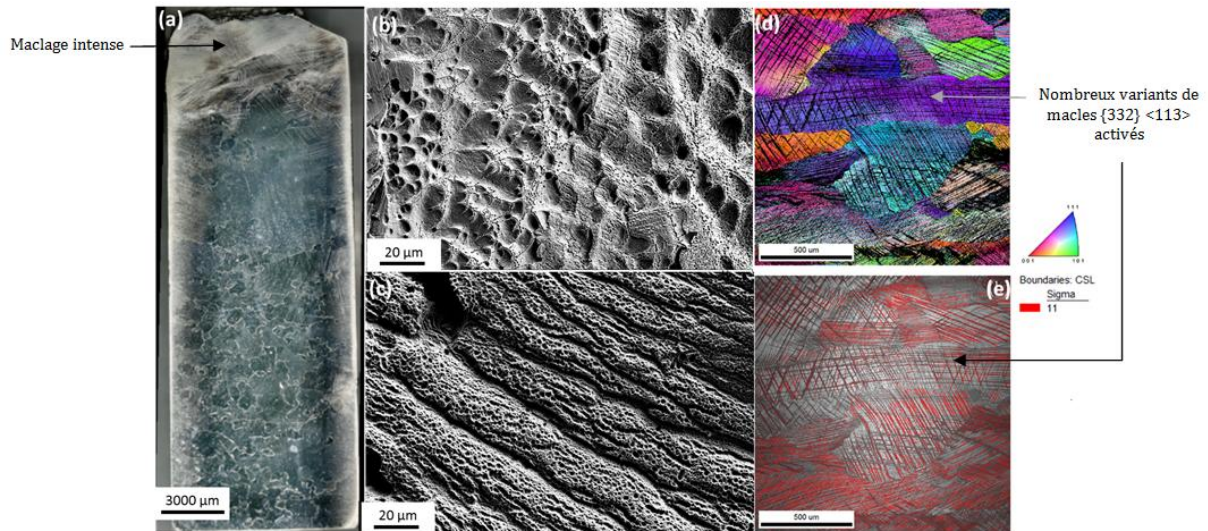
$$\epsilon_{rupture} = -2 \ln(1 - \epsilon_{radial}) \quad (1)$$

Par cette loi, on obtient une déformation vraie à rupture de 80 % pour le Ti-Cr-Sn TWIP contre 6 % pour le TA6V. Ce résultat montre un comportement rigoureusement différent des alliages transformables par déformation comparés aux alliages de titane conventionnels.

### 2.2 Analyses microstructurales à différentes échelles

La microstructure avant et après essai a été caractérisée (taille de grains, microtexture, anisotropie, taux de macles, phases en présence).

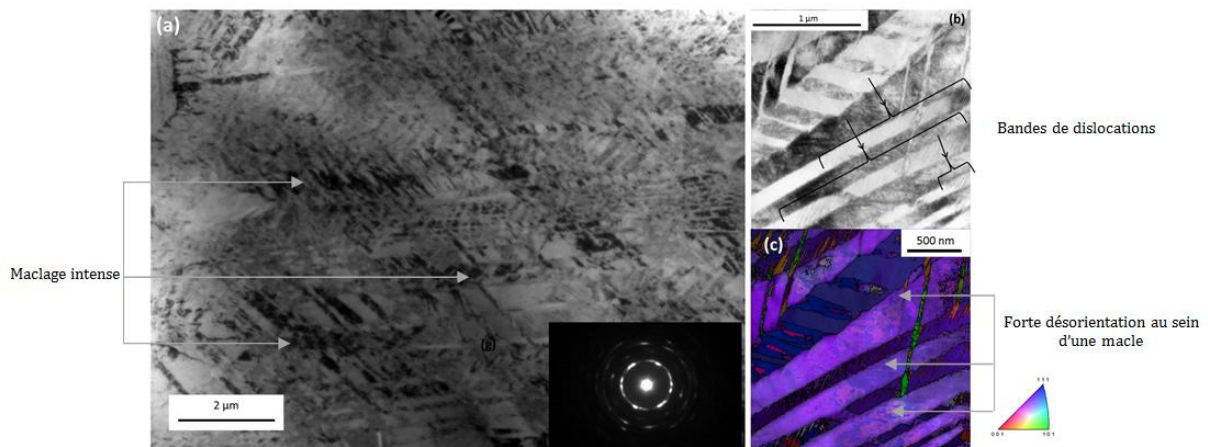
Des fractographies détaillées ont été réalisées, notamment après essais dynamiques d'impact Charpy (conduits afin d'évaluer les aspects d'absorption d'énergie). Après avoir révélé un paysage varié de rupture : cupules classiques, « terrasses » (Fig. 1. c et d) et clivage, la distribution spatiale des cupules a été corrélée avec la microstructure sous-jacente, mise en évidence par analyse de coupes polies ou par analyses EBSD proche du front de propagation de fissure (Fig. 2).



**Figure 2.** (a) Coupe polie attaquée d'une éprouvette entaillée Charpy ;  
 (b) (c) Fractographies révélant différents types de faciès caractéristiques ;  
 (d) Figure de pôle inversée d'une zone proche du faciès de rupture ;  
 (e) Carte Image Quality (IQ) associée et joints  $\Sigma 11$  (en rouge) caractéristiques des macles  $\{332\} \langle 113 \rangle$

Ces premières analyses, à l'échelle macro et microscopique, permettent de montrer une variation de la taille de cupules, plus grandes en statique qu'en dynamique. L'effet TWIP a également été mis en évidence, notamment l'importante densité de macles créées lors de la déformation. Près de la surface de rupture, où a été faite l'analyse EBSD (Fig 2. d et e), on observe une surface maillée à environ 50 % en moyenne, avec une densité locale de macles qui semble dépendre de l'orientation des grains par rapport à la sollicitation. Il semblerait par ailleurs que l'alliage se déforme par multiplication de macles plutôt que par grossissement, comme observé sur l'alliage Ti-12Mo [5].

Enfin, le faible taux d'endommagement (porosités, fissures faiblement voire nullement présentes) des éprouvettes testées a conduit à mener une étude à une échelle encore plus fine au MET sur des éprouvettes entaillées Charpy rompues, à nouveau au plus près du faciès de rupture (Fig. 3).



**Figure 3.** a) Image en champ clair d'une zone proche du faciès de rupture d'une éprouvette entaillée Charpy et cliché de diffraction associé ;

- b) Image en champ clair virtuel (*Virtual Bright Field*) obtenu lors d'une analyse PACOM (*Precession-Assisted Crystal Orientation Mapping*) au MET (les accolades et flèches noires marquent les bandes de dislocations) ;  
c) Figure de pôle inversée associée attestant de la forte désorientation présente au sein des macles

Cette deuxième série d'analyses, à l'échelle nanométrique cette fois, a permis de mettre en évidence un deuxième système de maillage  $\{112\} \langle 111 \rangle$ , tout en confirmant la présence du premier ( $\{332\} \langle 113 \rangle$ ). Une analyse approfondie des macles a également été menée et a montré que les macles étaient le siège d'une déformation localisée importante, au vu de la forte désorientation au sein des macles mise en évidence par analyse PACOM (Fig. 3.c), ainsi qu'une organisation hiérarchique des macles (des macles secondaires dans les macles primaires). Ce phénomène d'écroutissage de macles pourtant très fines pourrait participer à l'importante capacité d'écroutissage de ces alliages.

### 3. Conclusion

Cette étude a permis jusqu'ici de mettre en évidence le maillage sous différents types de sollicitations (statique et dynamique). L'analyse microstructurale multi-échelles rend compte de la complexité de ce mode de déformation et apporte déjà quelques pistes de compréhension.

La comparaison des alliages TRIP/TWIP et uniquement TWIP n'a pas été développée dans ce résumé mais l'analyse de l'effet TRIP est rendue compliquée du fait de la dimension de la phase martensitique (très inférieure à celle des macles) et de la résolution des équipements utilisés. Sa présence a été confirmée par DRX en rayonnement synchrotron mais les seules pistes sur le rôle de l'effet TRIP quant à la résistance à l'endommagement des alliages TRIP/TWIP reposent, pour l'instant, sur la comparaison des essais mécaniques entre alliages TRIP/TWIP et uniquement TWIP.

Les perspectives pour cette étude restent nombreuses mais une des pistes serait une étude en température ( $T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  et  $T > 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) afin d'activer ou de modifier l'un ou l'autre des mécanismes de déformation et de discerner leur rôle dans la résistance à l'endommagement de ces alliages de titanes transformables par déformation.

### Références

- [1] C. Brozek et al. (2016). *Scr. Mater.*, 114, 60-64.  
[2] H. Adachi et al. (1978). *J. Phys. Soc. Japan* 45, p. 875.  
[3] A. Gysler et al. (1974). *Acta metall.*, 22, p. 901  
[4] B. Sarre (2018). *Influence du soudage laser Nd : Yag sur les propriétés métallurgiques et mécaniques de l'alliage de titane TA6V. Thèse.*  
[5] F. Sun et al. (2010). *Mater Sci Eng A.*, 527:4262