



Etude du comportement mécanique d'un liner de titane

Melchior Simon-Perret, Jérôme Crépin, Thilo F. Morgeneyer

► To cite this version:

Melchior Simon-Perret, Jérôme Crépin, Thilo F. Morgeneyer. Etude du comportement mécanique d'un liner de titane. Matériaux 2010, Oct 2010, Nantes, France. 10 p. hal-00572468

HAL Id: hal-00572468

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00572468>

Submitted on 1 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude du comportement mécanique d'un liner de titane

M. SIMON-PERRET^a, J. CREPIN^a, T.F. MORGENEYER^a

^aMINES ParisTech, MAT-Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry Cedex
prénom.nom@mines-paristech.fr

RESUME:

Il s'agit dans ce travail d'étudier le comportement mécanique d'un liner constitué de titane T35, fourni sous la forme de feuillard de 300 µm d'épaisseur. Ce travail porte notamment sur la caractérisation du métal de base mais aussi sur celui des cordons de soudure.. Pour le matériau de base, les observations microstructurales ont révélé des grains équiaxes avec une texture classique de tôle laminée pour les matériaux hexagonaux. Les soudures montrent une microstructure moins régulière et une texture plus isotrope. D'un point de vue comportement mécanique, nous avons pu identifier au moyen d'essais de traction un comportement élastoviscoplastique anisotrope des tôles. Ces résultats expérimentaux ont permis l'identification de 3 modèles issus de la littérature, (Mises, Hill et Bron-Besson) donnant lieu à des comparaisons de simulation. Enfin une analyse tomographique réalisée à l'ESRF sur une éprouvette fissurée a révélée la présence de peu de cavités à proximité de la fissure

MOTS-CLES : Titane T35, anisotropie, élastoviscoplastique, identification, fissuration.

1. Introduction

Des réservoirs d'hélium sous haute pression sont embarqués sur les satellites, pour permettre la pressurisation des réservoirs d'ergols. Ce type de réservoir est composé de 2 structures imbriquées : un liner métallique servant à la fois de surface d'étanchéité et de mandrin d'enroulement du renfort de fibres, et d'une coque en matériau composite, obtenue par enroulement filamentaire. Cette coque assure la résistance mécanique du réservoir qui doit supporter des pressions largement supérieures à 300 bars.

De façon traditionnelle, le liner métallique est usiné dans des ébauches forgées de titane (TA6V). Le coût de ce procédé d'élaboration est très élevé, autant à cause du coût de la matière que de la durée des opérations d'usinage. Ce coût d'élaboration du liner rend son utilisation impossible pour des réservoirs plus courants. Un programme d'études (FRESCORT) a été mis en place pour développer une solution alternative par découpage, conformage et assemblage étanche de feuilles minces de titane préalablement laminé à une épaisseur de 0,3 mm. Cette façon de faire réduit la quantité de matière nécessaire mais nécessite la qualification du procédé d'assemblage et la garantie des propriétés mécaniques. La réalisation à partir de feuilles minces nécessite donc l'emploi d'un matériau à fort potentiel de déformation à froid. Pour cette raison, et bien que le titane faiblement allié ne soit pratiquement pas utilisé pour des applications structurales, c'est le T35 qui a été retenu, en particulier pour son importante ductilité. La technologie du liner, ainsi fabriqué, peut être industrialisée et devient utilisable pour des applications de type aviation ou pour le stockage de l'hydrogène (avec un autre matériau compatible), par exemples.

Le risque associé à une défaillance du liner est soit une fuite, soit une explosion, lorsque le réservoir est gonflé à sa pression maximale. Le travail du matériau dans le domaine plastique, à chaque cycle de gonflage - dégonflage, et le nombre de cycles à réaliser (environ 100), nécessitent d'optimiser les caractéristiques du matériau, aussi bien dans son état initial qu'après mise en œuvre par le procédé de fabrication. En cas de défaillance, le principe de sécurité est : « fuite avant explosion ». Cela signifie que la défaillance du réservoir de type « fuite », conduisant à la perte de pression, doit toujours intervenir avant rupture catastrophique du liner.

Cette étude a donc pour but de décrire le comportement élastoviscoplastique anisotrope, tant du point de vue du comportement que de la déchirure ductile, de feuillets de 300µm d'épaisseur de titane T35 en relation avec les aspects microstructuraux associés à son mode d'élaboration (taille de grains, texture cristallographique, etc...), conséquence du fort taux de réduction obtenu par laminage. On s'intéresse aussi à la caractérisation des cordons de soudures de ces liners. Une étude critique et non exhaustive de différents modèles de comportement est menée afin d'en déterminer la pertinence vis-à-vis de l'application.

2. Matériaux et conditions expérimentales

Tôles

Le matériau étudié est un titane commercialement pur T35 grade 1. Sa composition chimique est donnée dans le tableau 1. Le matériau de base est livré sous forme de tôles minces de 300µm d'épaisseur. Ces tôles ont été obtenues par laminage à froid suivi d'un traitement de recristallisation. Le matériau étant fourni sous forme de tôles laminées, le repère suivant a été adopté : L correspond à la direction de laminage, T à la direction transverse au laminage et S à l'épaisseur de la tôle.

	O (% max)	N (% max)	C (% max)	H (% max)	F (% max)	Ti
T35 grade1	0,18	0,03	0,08	0,015	0,2	reste

Tableau 1: Composition chimique du titane T35 grade 1 industriel (% massique)

Soudures

Pour l'élaboration du liner, les tôles sont mises en forme puis soudées entre elles bord à bord. Les cordons de soudures sont réalisés par soudage laser. Pour la réalisation de l'étude, il a été mis à disposition des cordons de soudure sans mise en forme préalable des pièces. Le matériau de base ainsi que les cordons de soudures ont été polis mécaniquement en vue d'observations par microscopie optique, microscopie électronique à balayage et EBSD.

Préparation microscopique

La procédure de polissage consiste en un polissage mécanique jusqu'au papier de granulométrie ASTM 600 suivi par un polissage à la pâte diamantée de 6µm puis 3µm et enfin 1µm. Ces phases de polissage doivent être réalisées avec précaution et en appuyant de façon modérée sur l'échantillon. Après ce polissage mécanique, une étape de finition à l'OPS est réalisée. Cette procédure de préparation d'échantillons permet en général de discerner la microstructure du matériau en lumière polarisée mais aussi en lumière blanche. Pour faire ressortir davantage la microstructure en lumière polarisée, il est toutefois possible de réaliser une attaque à base d'une solution 'Kroll' de 2ml de HF, 3ml de HNO₃ et 95ml de H₂O pendant environ 20sec. Cette attaque fait apparaître, de façon colorée la microstructure du matériau.

La procédure de polissage pour l'observation MEB et EBSD est la même que celle pour la microscopie optique (jusqu'à l'OPS inclus). Le temps de l'attaque chimique est toutefois diminué à environ 3 secondes pour éviter un relief trop important.

Le microscope optique utilisé est un Zeiss Axiovert 450M qui permet de travailler en fond clair, fond noir, lumière polarisée et contraste interférentiel. On a utilisé un microscope électronique à balayage de type Leo 1450VP-SEM240 pour réaliser des images en électrons secondaires et un Zeiss Gemini DSM 982 pour l'analyse EBSD.

Configuration des essais

La campagne d'essais mécaniques a été menée sur une machine de traction INSTRON équipée d'une cellule de charge de 5000N. Tous les essais sont instrumentés au moyen d'une méthode extensométrique sans contact utilisant une caméra numérique et une série d'objectifs adaptés ainsi qu'un logiciel de corrélation d'images [1]. Ce système d'acquisition permet l'obtention des composantes planes des champs de déplacement et de déformation au cours du chargement sans extensomètre mécanique, impossible à fixer sur des feuillets de 300 µm d'épaisseur.

Différents essais mécaniques ont été réalisés afin de caractériser le comportement des liners de titane. Dans un premier temps, l'étude du comportement anisotrope des feuillets de titane est effectuée au moyen d'essais de traction. Les éprouvettes sont usinées suivant différentes directions de prélèvement par rapport à la direction de laminage et la gamme de vitesse balayée est comprise entre 10⁻³ s⁻¹ et 10⁻⁴ s⁻¹. Pour atteindre des vitesses de déformation plus lentes, de l'ordre de 10⁻⁵ s⁻¹ à 10⁻⁶ s⁻¹, on a réalisé des essais de traction-relaxation à différents taux de déformation imposés, ce qui a permis de reconstruire les courbes « enveloppes » de traction à vitesse imposée. Chaque configuration d'essais a été réalisée au moyen de 3

éprouvettes afin d'assurer la reproductibilité de la mesure. Les essais de traction et de traction-relaxation sont réalisés à l'aide d'éprouvettes lisses comme présenté sur la figure 1.

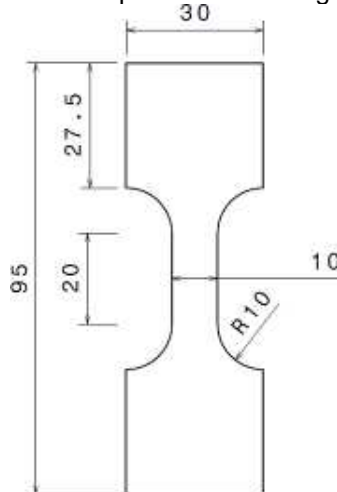


Figure 1 : géométrie d'éprouvette lisse de traction et traction-relaxation

De plus, des essais de traction sur éprouvettes entaillées ont été réalisés afin d'étudier la propagation de fissure en traction monotone. La géométrie des échantillons est présentée sur la figure 2 avec des entailles réalisées au centre de l'éprouvette par électroérosion. La vitesse de déformation appliqué sur les éprouvettes avec entaille est la même que pour un essai de traction sans entaille pour une vitesse de sollicitation de 10^{-3} s^{-1} . Deux configurations ont été étudiées : traction selon le sens L avec propagation dans le sens T (éprouvette LT) et traction selon le sens T avec propagation dans le sens L (éprouvette TL).

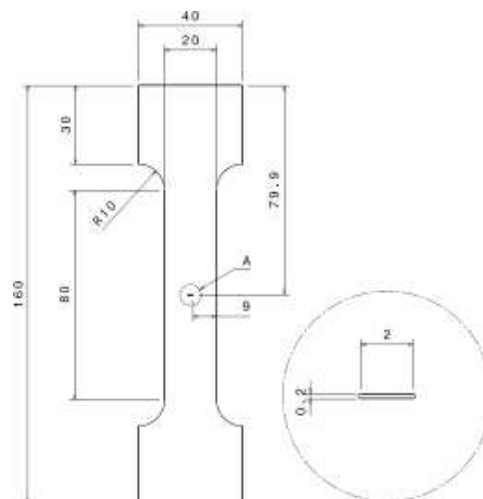


Figure 2 : géométrie d'éprouvette entaillée au centre pour étudier la propagation de fissure

Afin d'assurer une bonne prise des mors auto-serrants, des talons en aluminium ont été collés sur les têtes des éprouvettes.

Tomographie

Afin d'avoir une vision volumique (à la fois qualitative et quantitative) de l'endommagement en pointe de fissure, une étude par tomographie a été réalisée à l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility). L'énergie du faisceau utilisé a été fixée à 17,7keV. Cette technique consiste à réaliser un ensemble de radiographies X dans différentes positions angulaires de l'éprouvette. A l'aide de méthodes de reconstructions mathématiques [2], on peut alors obtenir des informations d'atténuation en 3 dimensions du volume scanné. La taille spatiale des voxels est de $0,7*0,7*0,7 \mu\text{m}^3$. Du fait du coefficient d'atténuation du titane et de l'énergie du faisceau utilisée, cet essai nécessite une section de l'échantillon de l'ordre du millimètre carré. Il a donc fallu découper une mini-éprouvette contenant la pointe d'une fissure arrêtée associée à la déchirure ductile observée au sein d'une éprouvette (LT en l'occurrence). Cette mini-éprouvette a les dimensions suivantes : 1mm de large, 3mm de haut et 0,3mm d'épaisseur. 3 scans de $1024*1024*512$ pixels ont été réalisés afin de couvrir l'ensemble de l'échantillon. Puis à l'aide du logiciel Avizo l'ensemble du volume analysé a été reconstitué puis redimensionné jusqu'à une taille de $977*804*194$ voxels.

3. Microstructure

Des observations du matériau de base ainsi que du matériau soudé par laser ont été réalisées dans les plans LT, LS et TS. Le liner en titane T35 a été observé par microscopie optique, MEB et EBSD. Ces observations ont permis de caractériser la microstructure, composée de grains équiaxes dont le diamètre moyen est de 30 μm (Fig 3). Ce matériau présente, en outre, une texture classique de tôles laminées pour les matériaux de structure hexagonale ([3,4]). Les axes $\langle c \rangle$ ($\langle 002 \rangle$), sont, en effet, préférentiellement orientés à 30° de la normale au plan de la tôle dans le plan (TS). Les axes $\langle a \rangle$ ($\langle 10\bar{1}0 \rangle$) s'orientent, quand à eux, préférentiellement de part et d'autre de la direction de laminage (L) (Fig 3).

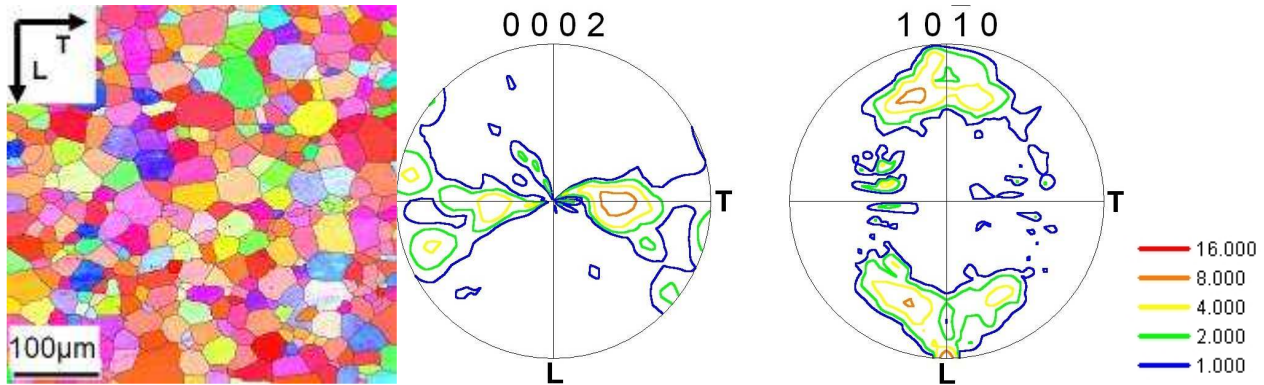


Figure 3: Cartographie des orientations cristallines et figures de pôles du matériau de base

Par contre, la caractérisation des cordons de soudures a révélé une texture beaucoup plus isotrope conséquence de la transformation allotropique cubique centrée \rightarrow hexagonale compacte ([5]) qui se produit à 882 $^{\circ}\text{C}$ lors du refroidissement (Fig 4). De plus, la microstructure présente des grains beaucoup moins réguliers dont le diamètre moyen est de 40 μm (Fig 4).

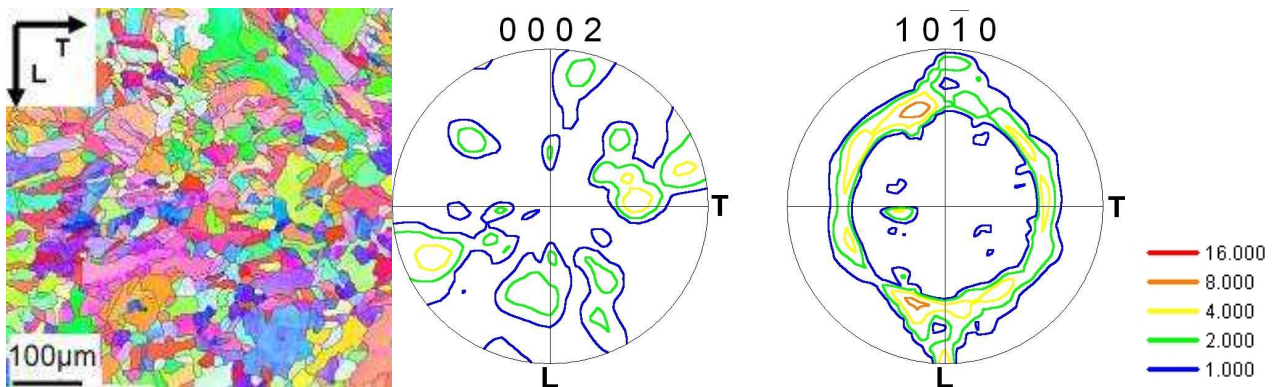


Figure 4: Cartographie des orientations cristallines et figures de pôles du cordon de soudure

4. Essais mécaniques

Comportement

Les essais de traction et de traction-relaxation ont permis de mettre en évidence un comportement élastoviscoplastique anisotrope. Cette anisotropie concerne à la fois la surface de charge et son évolution (Fig 5) mais aussi le champ de déformation qui se caractérise par un coefficient de Lankford très différent de 1. Cette anisotropie peut sans doute être liée à la texture du liner. L'effet de viscosité se caractérise, quand à elle, par une augmentation de la valeur de la contrainte d'écoulement lorsque la vitesse de déformation augmente. Les valeurs de limite d'élasticité et de coefficient de Lankford, défini comme $R = \frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{33}}$

(ϵ_{22} correspond à la déformation transversale et ϵ_{33} à la déformation dans l'épaisseur dans le repère de l'éprouvette), pour les directions et les vitesses étudiées sont résumées dans le tableau 2.

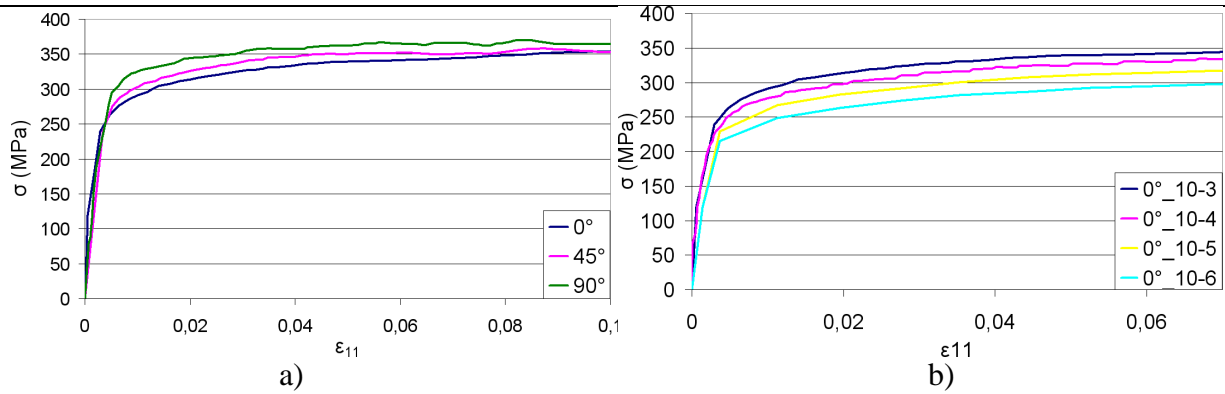


Figure 5: courbes de traction a) pour une sollicitation suivant l'axe L et différentes directions de prélèvement, vitesse de déformation de 10^{-3}s^{-1} b) pour différentes vitesses de déformation pour une direction de prélèvement de 0° parallèle à la direction de laminage (L)

	10^{-3}s^{-1}		10^{-4}s^{-1}		10^{-5}s^{-1}		10^{-6}s^{-1}	
	$\sigma_{0,2}$	R	$\sigma_{0,2}$	R	$\sigma_{0,2}$	R	$\sigma_{0,2}$	R
0°	252	1,3	247	1,48	232	1,51	218	1,51
45°	262	2,5	258	2,6	240	2,93	224	2,93
90°	308	2,68	285	3,5	262	4,36	240	4,36

Tableau 2 : Limite d'élasticité et coefficient de Lankford en fonction de la direction de prélèvement et de la vitesse de sollicitation

Rupture

L'étude des faciès de rupture d'éprouvettes lisses observés après un essai de traction simple a permis de mettre en évidence la présence de cupules sur la surface de rupture (Fig 6). Il a aussi été observé une réduction de l'épaisseur de l'ordre de 50%.

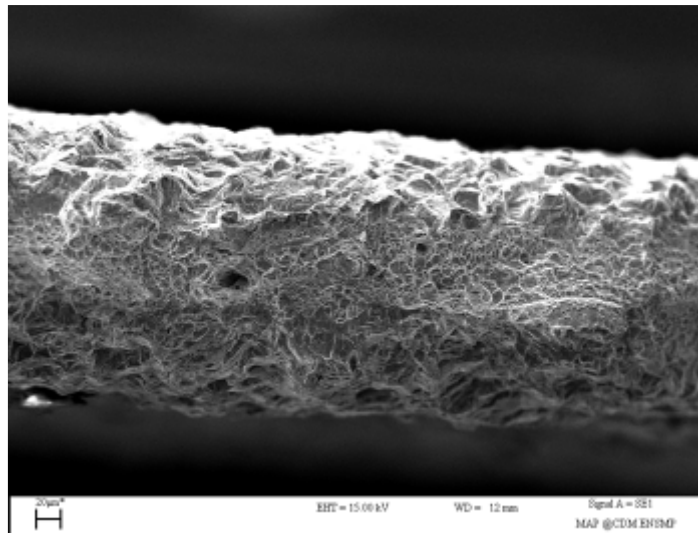


Figure 6 : faciès de rupture d'une éprouvette lisse

Les essais de propagation de fissure à vitesse de déplacement de traverse imposée et instrumentés à l'aide d'une caméra numérique ont montré une propagation stable de l'entaille à partir d'une contrainte critique de 314 MPa pour l'éprouvette LT et de 327MPa pour l'éprouvettes TL comme le montre la figure 7.

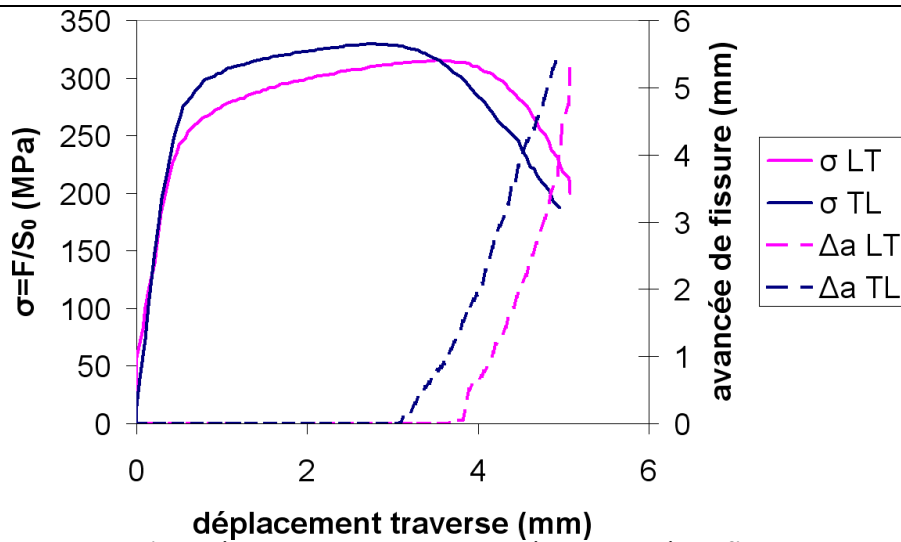


Figure 7 : courbes contrainte-déplacement traverse observées et avancée de fissure dans le plan de la tôle

Afin de compléter cette étude, une analyse tomographique de la pointe de fissure, pratiquée après une phase de propagation a été réalisée. L'expérience a eu lieu à L'ESRF. Cette étude tomographique montre la présence de peu de cavités à proximité de la fissure (0,022% du volume), cette dernière présentant un plan de propagation en biseau compris entre 30° et 45° au niveau de la zone d'observation (Fig 8).

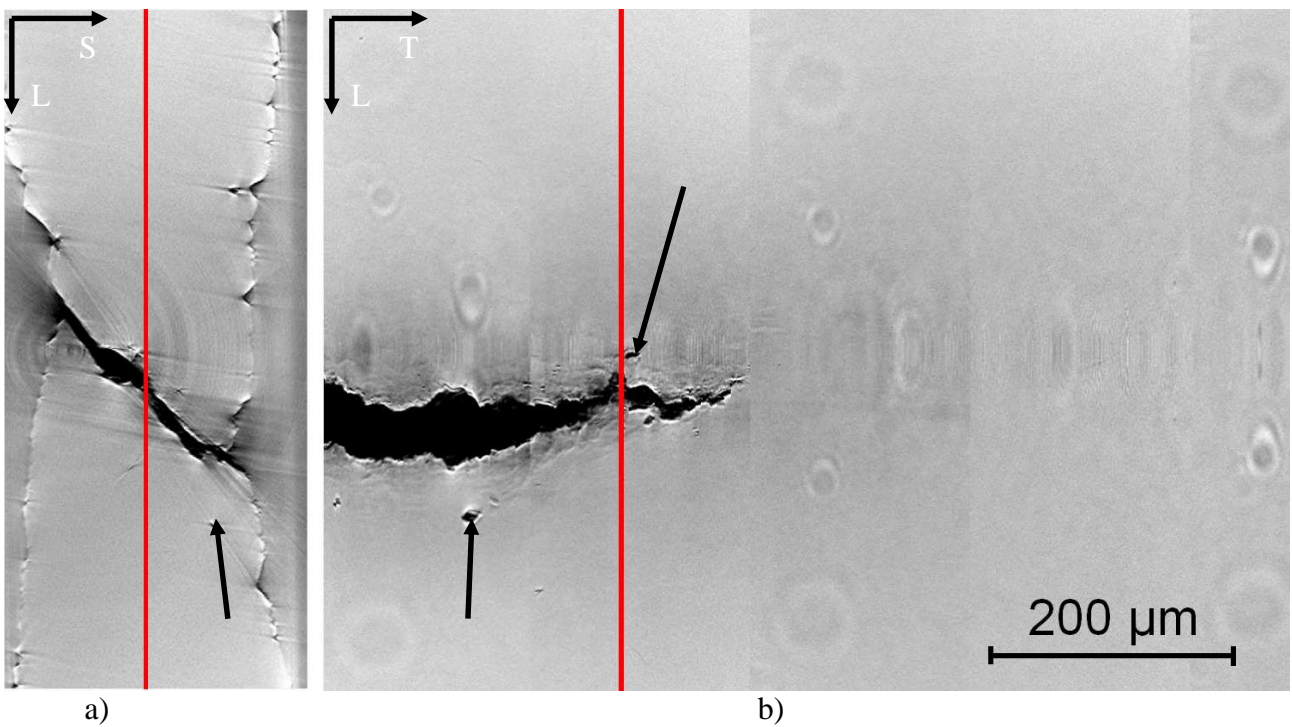


Figure 8 : section 2D de l'éprouvette observée en tomographie a) dans le plan LS et b) dans le plan LT ; les flèches indiquent la présence de cavités

6. Modélisation

Afin de valider l'approche industrielle, qui repose sur l'utilisation d'une loi isotrope de type Mises, 3 types de modèle issus de la littérature ont été étudiés et identifiés à partir de la base expérimentale qui a été établie:

- un modèle isotrope de Von Mises [6] dont la limite d'écoulement plastique est définie comme :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

- un modèle anisotrope de type Hill [7] dont la limite d'écoulement plastique est définie comme :

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{B+C} (A(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + B(\sigma_3 - \sigma_2)^2 + C(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 6(L\tau_{12}^2 + M\tau_{23}^2 + N\tau_{31}^2))}$$

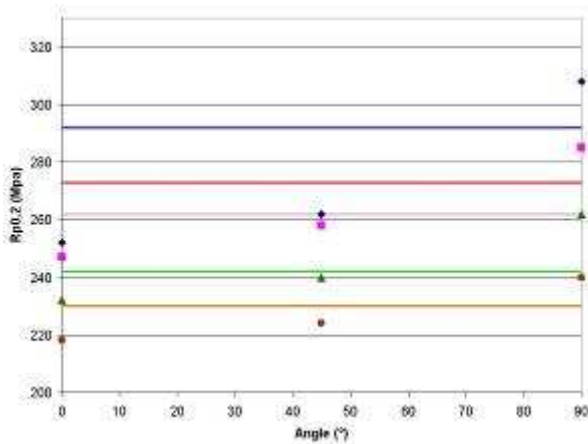
- un modèle anisotrope de type Barlat/Bron-Besson [8] dont la limite d'écoulement plastique est définie comme :

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} (|\tilde{\sigma}_2 - \tilde{\sigma}_3|^b + |\tilde{\sigma}_3 - \tilde{\sigma}_1|^b + |\tilde{\sigma}_1 - \tilde{\sigma}_2|^b) \right)^{1/b} \text{ avec : } \underline{\tilde{\sigma}} = \underline{\underline{L}} : \underline{\underline{\sigma}}$$

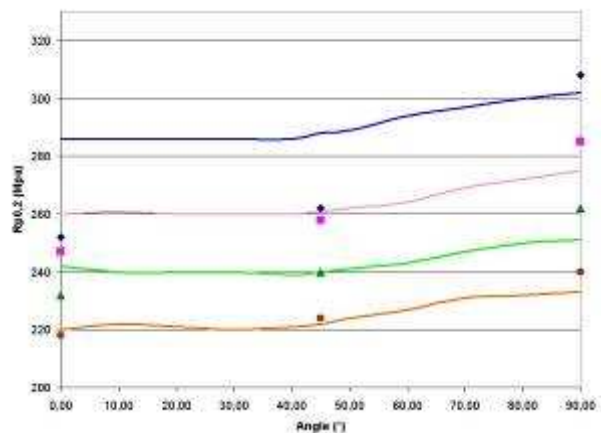
$$\underline{\underline{L}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3}(c_2 + c_3) & -\frac{1}{3}c_3 & -\frac{1}{3}c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3}c_3 & \frac{1}{3}(c_3 + c_1) & -\frac{1}{3}c_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3}c_2 & -\frac{1}{3}c_1 & \frac{1}{3}(c_1 + c_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{a} & 0 & 0 & c_6 \end{pmatrix}$$

Chacun de ces modèles présente une même formulation de viscoplasticité : $\sigma = K\dot{\epsilon}^n$ (Ramberg et Osgood [9]) et d'écrouissage isotrope de type : $R(p) = R_0(1 + Q(1 - e^{-b \times \epsilon_p}) + H\epsilon_p)$ (loi de Voce [10] modifiée).

Les modèles de Hill et Bron-Besson semblent caractériser de manière identique les effets d'anisotropie (Fig 9). On observe toutefois une différence importante de la prédiction de la limite d'élasticité pour une direction de prélèvement de 0° et une vitesse de déformation de $10^{-3} s^{-1}$ pour ces deux modèles vis-à-vis des données expérimentales.



a)



b)

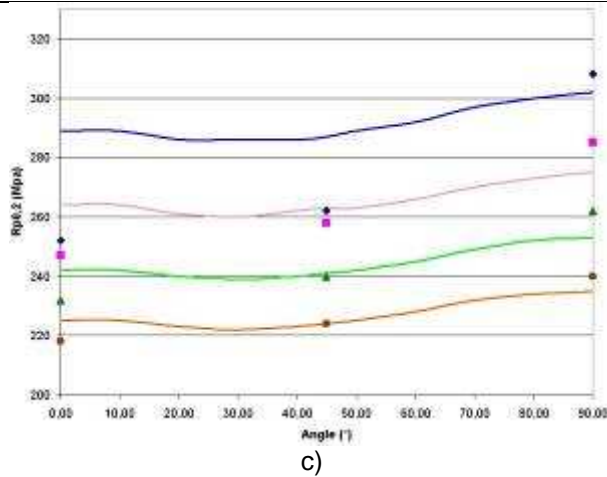


Figure 9 : évolution de la limite d'élasticité en fonction de la direction de prélèvement et de la vitesse de sollicitation (bleu : $10^{-3}s^{-1}$, rose : $10^{-4}s^{-1}$, vert : $10^{-5}s^{-1}$, orange : $10^{-6}s^{-1}$) suivant les modèles a) Von Mises b) Hill c) Bron-Besson ; les points correspondent à la base de données expérimentale et les courbes aux simulations numériques

L'estimation de l'écart relatif, entre les simulations et les données expérimentales pour étudier l'effet viscoplastique, est représentée sur la figure 10a. Cet écart relatif est calculé comme

$$\Sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{0,2;mod\ \grave{e}le}^i - \sigma_{0,2;exp}^i)}{\sigma_{0,2;exp}^i}$$

pour chaque orientation, l'indice i correspondant aux différentes vitesses de sollicitation.

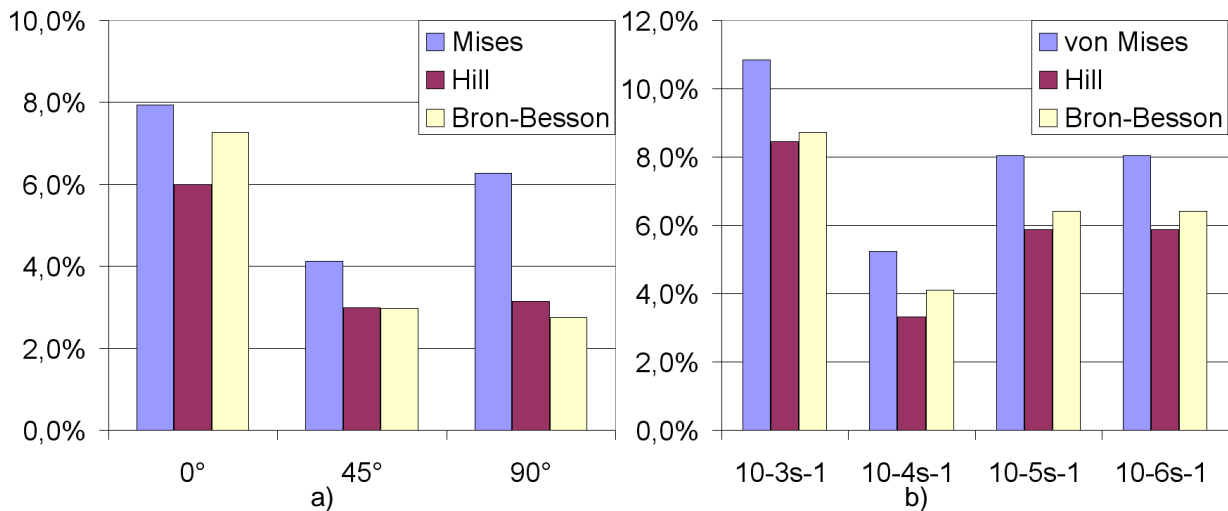
Pour étudier l'effet de l'orientation du prélèvement vis-à-vis de la direction de laminage sur le comportement mécanique, l'écart relatif entre les simulations et les données expérimentales est calculé

$$\Sigma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{(\sigma_{0,2;mod\ \grave{e}le}^j - \sigma_{0,2;exp}^j)}{\sigma_{0,2;exp}^j}$$

comme $\Sigma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{(\sigma_{0,2;mod\ \grave{e}le}^j - \sigma_{0,2;exp}^j)}{\sigma_{0,2;exp}^j}$ pour chaque vitesse de sollicitation, l'indice j correspondant à la

direction de prélèvement. Ces résultats sont présentés sur la figure 10b.

Lorsque l'on considère un modèle isotrope sans viscoplasticité, l'erreur maximale calculée en prenant pour référence la loi de comportement identifiée par le modèle de von Mises à $10^{-3}s^{-1}$, est de 21,7%. Les 3 modèles étudiés dans cette étude donnent donc des erreurs plus faibles. Cependant, la figure 10c, qui représente l'écart relatif entre les données expérimentales et les simulations pour la vitesse de sollicitation de $10^{-3}s^{-1}$, montre des différences relativement importantes principalement pour une direction de prélèvement de 0° (entre 13,5 et 16% suivant les modèles), confirmant le fait que la procédure d'identification n'est pas optimisée.



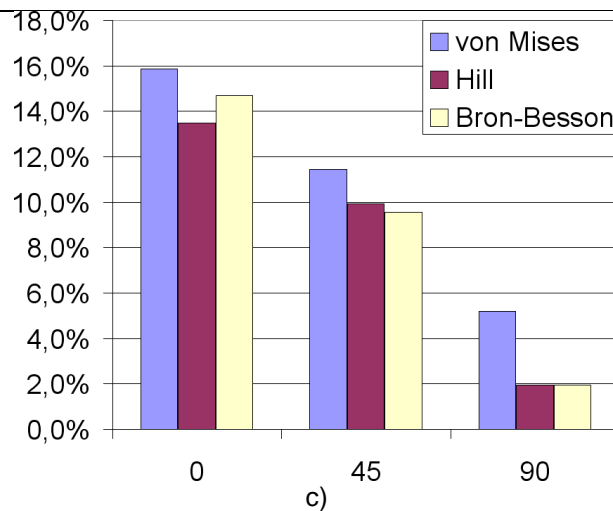


Figure 10 : écart moyen entre simulations et données expérimentales permettant de mettre en évidence la pertinence des modèles vis à vis a) de l'effet viscoplastique b) de l'anisotropie de chargement. La figure 10c indique l'écart moyen entre simulations et données expérimentales pour une vitesse de sollicitation de $10^{-3} s^{-1}$

Des essais complémentaires sont donc prévus pour affiner l'optimisation des paramètres. Ainsi des essais de traction pour des directions de prélèvement de 15°, 30°, 60° et 75° vis-à-vis de la direction de la minage seront réalisés pour toute la gamme de vitesse. Seront de plus ajoutés, des essais de cisaillement nécessitant la conception d'un banc spécialement élaboré pour les tôles minces.

7. Conclusions et perspectives

L'étude du matériau de base a montré une microstructure texturée constituée de grains équiaxes. Après soudage, la texture des feuillards de titane T35 est devenue plus isotrope et les grains sont bien moins réguliers. Nous souhaitons approfondir et détailler ces observations en réalisant de nouvelles analyses EBSD, en particulier sur les cordons de soudures. Nous nous intéresserons notamment à la concentration en éléments d'addition comme l'oxygène..

Le matériau de base montre un comportement mécanique élastoviscoplastique anisotrope. Nous venons de montrer que même si le comportement moyen est relativement bien représenté par des modèles issus de la littérature, des différences importantes sont toutefois observées. Ainsi, les paramètres de ces modèles seront affinés en ajoutant à la base expérimentale des essais complémentaires (autres orientations de prélèvement ainsi que des essais de cisaillement).

Une étude approfondie du comportement mécanique des cordons de soudures sera réalisée. Différentes configurations de soudures seront analysées en faisant varier les orientations relatives (L,T) des deux tôles à souder: L/L, T/T et L/T. Tout comme pour le matériau de base des essais de traction et de cisaillement seront réalisés.

Enfin, l'analyse tomographique sera complétée par d'autres essais de déchirure ductile afin de mieux quantifier le phénomène de fissure en biseau actuellement rencontré. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'effet de texture (orientation de l'axe $\langle c \rangle$) sur la direction du biseau.

8. Remerciements

Nous souhaitons remercier le pôle de compétitivité ASTech Paris Région ainsi que le Conseil Général de l'Essonne pour leur soutien au projet FRESORT (Futur REservoir à Structure Composite de Rupture Technologique). Nous remercions également les partenaires industriels ATMOSTAT pour nous avoir fourni les tôles de titane T35 ainsi que les cordons de soudures et Astrium Space Transportation. Merci à M. TOUBOUL, pour les nombreux conseils concernant la corrélation d'images ainsi qu'au Centre des Matériaux, MinesParisTech.

9. References

- [1] M. Bornet et al., Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results, *Experimental Mechanics*, 49, 3, p. 353-370, 2009
- [2] E. Maire, J.Y. Buffière, L. Salvo, J.J. Blandin, W. Ludwig, J.M. Letang, On the application of x-ray microtomography in the field of materials science, *Advanced Engineering Materials*, 3, 8, p. 539-546, 2001
- [3] M.J. Philippe, F. Wagner, C. Esling, Proc. Eighth Int. Conf. on Texture of Materials ICOTOM 8, p. 837, 1988
- [4] Philippe M.J., Mellab F.E., Wagner F., Esling C., Hocheud B., Evolution of texture and mechanical properties of titanium alloys according to doping, sixth world conference on titanium, 1988
- [5] Burgers W.G., The process of transition of the cubic body-centered modification into the hexagonal close-packed modification of zirconium, *Physica*, 1, p.561, 1934
- [6] R. von Mises, *Mechanik der Festen Körper im plastisch deformablen Zustand*. Göttin Nachr. Math. Phys, 1, p. 582-592, 1934
- [7] R. Hill, A theory of the yielding and plasticity flow of anisotropic metals, *Proc. R. Soc. Lond A*, 193, p. 281-297, 1948
- [8] F. Bron, J. Besson, A yield function for anisotropic materials Application to aluminium alloys, *International Journal of Plasticity*, 20, p. 937-963, 2004
- [9] W. Ramberg, W.R. Osgood, Description of stress-strain curves by three parameters, National Advisory Committee For Aeronautics, technical note n°902, 1943
- [10] E. Voce, The relationship between stress and strain for homogeneous deformation, *J. Inst. Metals*, 74, p. 537-562, 1948