

CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT CYCLIQUE D'UN MATÉRIAU TISSE EN TRACTION ONDULÉE

G.Bles¹, W.K.Nowacki² & A.Tourabi³

⁽¹⁾ ENSIETA, Laboratoire MSN, 2 rue François Verny, 29806 Brest cedex 9, France.

⁽²⁾ Institute of Fundamental Technological Research, ul. Swietokrzyska 21, 00-49 Warsaw, Poland.

⁽³⁾ Laboratoire 3SR, Domaine Universitaire, B.P. n 53, 38041 Grenoble cedex 9, France.

(Ali.Tourabi@hmg.inpg.fr)

Résumé :

Des résultats expérimentaux sur un matériau tissé en fils de polyamide 6-6 (PA66) sont présentés. Les essais ont été effectués d'une part en traction monotone à différentes vitesses de déformation et d'autre part en sollicitations cycliques sophistiqués de type traction ondulée avec des séquences de fluage ou de relaxation.

Abstract :

Experimental results obtained on polyamid-based (PA66) braiding samples are presented. The tests are performed, on the one hand under monotonous tension at different strain rates and on the other hand under sophisticated cyclic loadings of undulating tension type, including relaxation and creep paths.

Mots-clefs :

Matériaux tissés ; viscoélastoplastique ; cyclique

1 Introduction

Les matériaux tissés sont utilisés dans une multitude d'applications industrielles, telles que l'architecture et la construction textiles (couvertures mobiles ou fixes de théâtre en plein air, hangar d'aviation, terminal d'aéroport, parc d'exposition, gare ferroviaire ...) ou l'aéronautique (surface portante d'ULM, toiles et suspentes de parachutes, sangles d'éjecteurs ou sangles de parachutes de charges...). Le comportement thermomécanique des matériaux tissés est complexe : des processus physiques réversibles et irréversibles agissent simultanément, à l'échelle mésoscopique (au niveau du tissage) et à l'échelle microscopique (au niveau de la fibre individuelle) (G.Bles *et al.* 2000), (G.Bles *et al.* 2002), (G.Bles 2002).

Le matériau tissé, que nous avons adopté pour notre étude expérimentale, est une sangle employée par les parachutistes pour l'extraction et le largage de charges lourdes, à partir des soutes d'un avion en vol. Les matériaux de type sangle, présentent l'avantage d'être des structures assimilables, dans une certaine mesure, à des matériaux tissés unidimensionnels. L'analyse expérimentale de leur comportement présente donc un intérêt méthodologique pour l'étude du comportement des matériaux tissés en général.

2 Techniques expérimentales

2.1 Matériaux et éprouvettes

Deux lots de sangles ont été utilisés. Les matériaux correspondants ont été tissés en fils de polyamide 6-6 (PA66) et possèdent la même référence constructeur R6161. Les sangles du

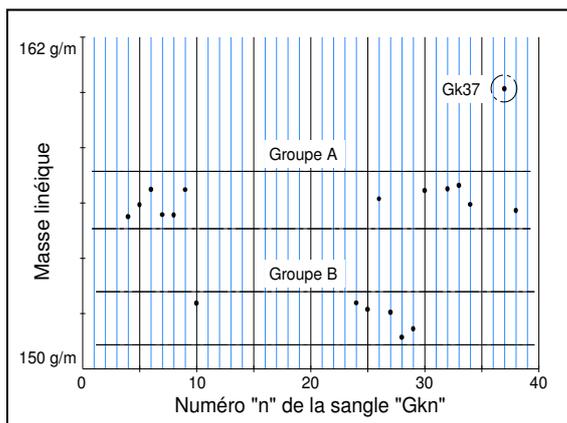


Fig. 1 – Mesures des masses linéiques répartissant les sangles kaki en deux groupes distincts ; le groupe A et le groupe B.

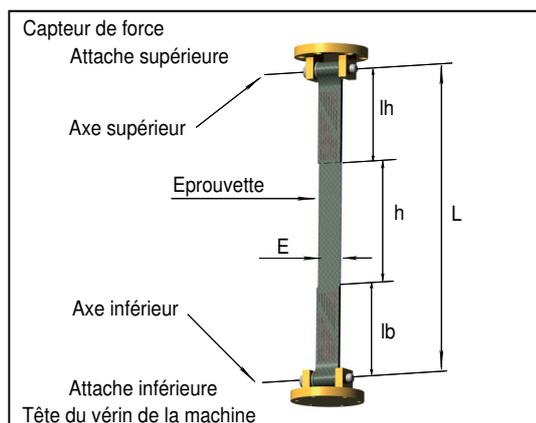


Fig. 2 – Schéma de montage de l'éprouvette sur la machine d'essai.

premier lot ont une couleur verte. Les sangles du second lot ont une couleur kaki. Les sangles kaki se répartissent en deux groupes A et B, qui se distinguent par leur masse linéique (fig. 1). Chaque éprouvette est identifiée, dès réception du lot, par un code alphanumérique à quatre caractères $GvNM$ ou $GkNM$: le sigle Gv ou Gk pour sangle verte ou sangle kaki respectivement, et un numéro d'ordre NM . L'éprouvette comporte une partie centrale de sangle simple, de longueur égale à environ trois fois la largeur de la sangle, et une boucle fermée par une couture, à chaque extrémité (fig. 2). La géométrie initiale des éprouvettes (longueurs de couture, entre-axe ...) a été caractérisée rigoureusement pour chaque sangle. A titre indicatif, nous donnons les valeurs moyennes des paramètres géométriques décrits à la figure 2 et les écarts-types correspondants, obtenus pour les sangles kaki : $L = 491,0 \pm 0,5 \text{ mm}$ ($d.c. = 95\%$, $n = 40$), $h = 149,5 \pm 0,7 \text{ mm}$ ($d.c. = 95\%$, $n = 40$), $l_h = 171,2 \pm 0,5 \text{ mm}$ ($d.c. = 95\%$, $n = 40$) et $l_b = 170,3 \pm 0,4 \text{ mm}$ ($d.c. = 95\%$, $n = 40$).

2.2 Section de l'éprouvette et calcul de la contrainte

Les variables généralisées (force et déplacement) mesurées au cours de l'essai doivent être traduites en variables locales (contrainte et déformation) dans le cadre de la mécanique des milieux continus. L'hypothèse fondamentale de la continuité du milieu et de ses propriétés physiques ne pose pas de problème particulier dans le cas d'un matériau massif. Dans le cas des matériaux tissés cette hypothèse peut être discutable selon la nature du tissage. En effet, ces matériaux ne sont pas des matériaux continus au sens strict, si on considère l'échelle mésoscopique du tissage. Deux points de vue peuvent alors se présenter et conduisent à deux approches différentes : le premier serait de considérer le fil comme le milieu continu à étudier et le tissu serait alors une structure ; le second serait de considérer le matériau tissé au niveau macroscopique comme un milieu continu et homogène. La première approche se heurte à des difficultés importantes d'ordre théorique et expérimental liées à : la prise en compte de la nature du tissage, à la prise en compte des frottements entre les fils, à la complexité de l'état de contrainte dans les fils, à la difficulté de réaliser des essais mécaniques homogènes sur les fils et de mesurer localement la déformation... . L'approche macroscopique présente l'avantage d'éviter ce type de difficultés, mais doit s'accompagner d'un examen attentif de la nature du tissage, pour justifier la validité de l'hypothèse de continuité du milieu. Nous avons donc adopté cette dernière approche, qui correspond mieux à nos possibilités expérimentales et à notre démarche macroscopique phénoménologique (G.Bles *et al.* 2000). Par ailleurs, pour tenir compte de la nature

du tissage, nous conviendrons d'une petite correction de la section apparente de la sangle utilisée pour traduire la force en contrainte. La section apparente S_{app} de la sangle est caractérisée par : $E = 44,4 \pm 0,4 \text{ mm}$ et $e = 3,8 \pm 0,1 \text{ mm}$, respectivement la largeur et l'épaisseur de la sangle. La correction de la section apparente de la sangle a pour but de prendre en compte les vides contenus dans le tissage. Autrement dit, de faire correspondre à la section apparente de la sangle en matériau tissé une section compacte d'un matériau continu homogène équivalent. Pour calculer le facteur de correction, nous adoptons un schéma très simple, pour lequel le matériau tissé, serait constitué de fils à section circulaire de même diamètre, serrés les uns contre les autres, de façon qu'un fil soit entouré de six voisins. La section corrigée ainsi obtenue est : $S = 0,9 \cdot S_{app} = 152 \pm 6 \text{ mm}^2$. Par la suite, la contrainte de traction dans la zone utile de l'éprouvette sera définie par : $\sigma = F/S$ la contrainte de Piola-Kirchhoff où F est la force exercée sur l'éprouvette.

2.3 Mesure locale de la déformation de la sangle

Nous avons conçu un dispositif d'adaptation d'un extensomètre standard pour la mesure de la déformation sur la sangle en matériau tissé. Ce dispositif est présenté à la figure 3. Deux pièces métalliques sont serrées sur la sangle au moyen de pinces ressorts. Une aiguille traverse de part en part les pièces de serrage et la sangle, afin de bien ancrer le dispositif au matériau et d'éviter tout glissement le long de la sangle. Deux tiges cylindriques sont fixées sur chacun des deux ensembles de serrage. Un extensomètre uniaxial standard est alors fixé sur ces deux tiges cylindriques. Le mouvement des couteaux de l'extensomètre suit alors les tiges et donc le mouvement des aiguilles insérées dans la sangle. La base de mesure est égale à la distance initiale entre les deux aiguilles, notée b_y . Afin de définir précisément cette base de mesure, les aiguilles et tout le dispositif sont mis en place au moyen d'un gabarit assurant une distance précise $b_y = 50 \pm 0,01 \text{ mm}$ entre les deux aiguilles. La déformation de la sangle sera alors : $\varepsilon_{yy} = \Delta y/b_y$ où Δy représente le déplacement relatif mesuré par l'extensomètre.

3 Description des essais et résultats typiques

Dans cette section, nous donnerons une description des essais, ainsi que quelques résultats typiques.

3.1 Essais de traction monotone

Nous avons réalisé des essais de traction monotone contrôlés en vitesse de déformation. Certains essais se terminent par une séquence de relaxation à une déformation constante. La figure 4 donne un résultat typique dans le cas des essais sur les sangles kaki du groupe A, dans un graphe contrainte-déformation. Ces courbes de traction monotone présentent une forme caractéristique avec trois zones distinctes, de pentes différentes dans le graphe contrainte-déformation : la première zone se situe à une contrainte inférieure à 50 MPa , la deuxième zone se situe entre 50 et 100 MPa environ et une troisième zone se situe au-delà de 100 MPa . La transition entre la zone un et la zone deux est caractérisée par un coude assez net et progressif. La transition entre la zone deux et la zone trois est très progressive.

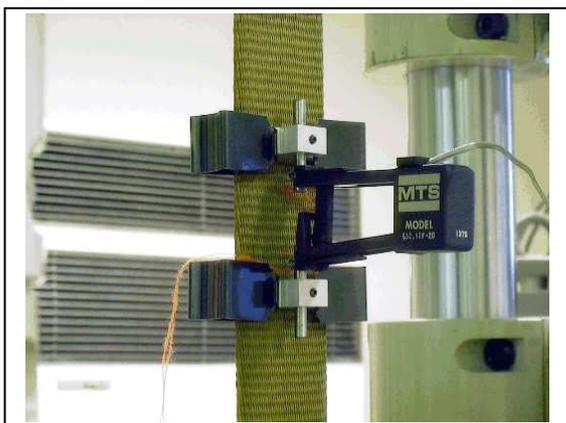


Fig. 3 – Dispositif de mesure locale de la déformation de la sangle en matériau tissé.

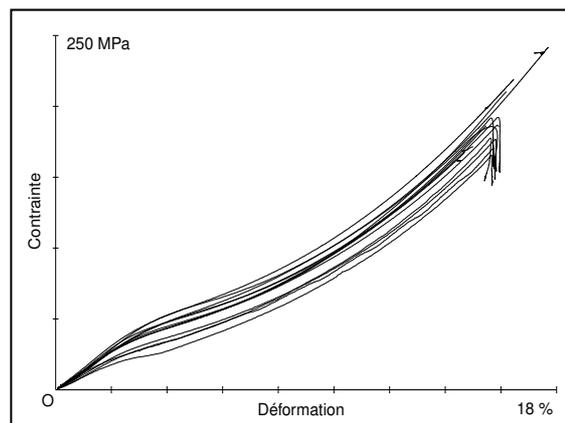


Fig. 4 – Résultats d'essais de traction monotone à des vitesses de déformation allant de 10^{-5} s^{-1} à 3.10^{-1} s^{-1} sur les sangles kaki du groupe A.

3.2 Essais de traction ondulée

Ces essais correspondent à une sollicitation à vitesse de déformation constante imposée. Ils comportent des cycles pour lesquels la vitesse de déformation change de signe mais garde une valeur absolue constante. Les points d'inversions sont définis d'une part avec une amplitude de déformation donnée, d'autre part par une limite à force de traction nulle. Le but de ces essais est de caractériser le comportement irréversible des sangles. La figure 5 donne un résultat typique de traction ondulée. Ce résultat révèle la forme caractéristique en "haricot" des cycles contrainte-déformation, que l'on observe généralement sur les matériaux tissés.

3.3 Essais de traction ondulée avec reptation des cycles

Ces essais sont des tractions ondulées à vitesse de déformation constante imposée, qui consistent à répéter un cycle de charge-décharge entre deux valeurs de déformation constantes imposées. La figure 6 donne un résultat typique. Ce résultat révèle un phénomène de reptation des cycles, qui se manifeste par une diminution globale de la contrainte, sur l'ensemble de la boucle d'hystérésis, avec le nombre de cycle. Ce phénomène se stabilise après un certain nombre de cycle. Le temps caractéristique du phénomène de reptation des cycles contrainte-déformation est lié à la vitesse de déformation de la même manière que le phénomène de relaxation (G.Bles 2002).

3.4 Essais de traction ondulée interrompue par des séquences de relaxation

Ces essais sont contrôlés en vitesse de déformation constante et interrompus par des séquences à déformation constante durant lesquelles le matériau relaxe. Les résultats de trois essais sont donnés par les figures 7 et 8. L'essai *Gv36* (fig. 7) comporte trois cycles de charge-décharge. L'essai *Gk38* (fig. 8) ne comporte qu'un seul cycle de charge-décharge. L'essai *Gk37* est une traction monotone réalisée à la même vitesse de déformation que celle de l'essai de traction ondulée *Gk38*. Les relaxations se traduisent par une diminution ou une augmentation de l'intensité de contrainte selon la position de la séquence de relaxation dans la boucle d'hystérésis. Sur la courbe de première charge, la contrainte diminue systématiquement au cours des relaxations. Si on considère l'essai *Gv36* (fig. 7), une règle semble se dégager à ce propos : le signe de variation de la contrainte au cours de la relaxation est opposé au signe de la vitesse de

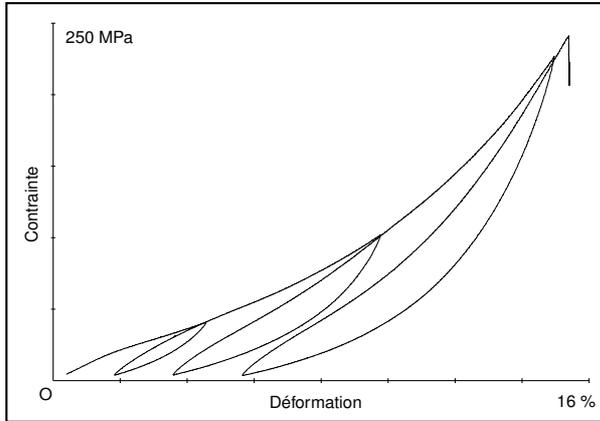


Fig. 5 – Résultat de l’essai *Gv35* de traction ondulée ($\dot{\epsilon} = 10^{-5} s^{-1}$).

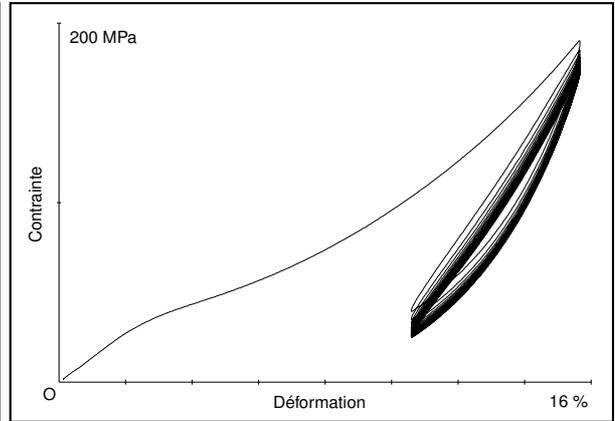


Fig. 6 – Résultat de l’essai *Gk08* de traction ondulée ($\dot{\epsilon} = 10^{-2} s^{-1}$).

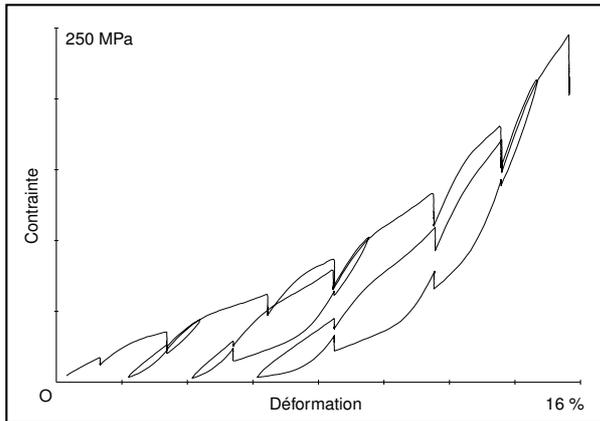


Fig. 7 – Résultat de l’essai *Gv36* de traction ondulée avec relaxations ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$).

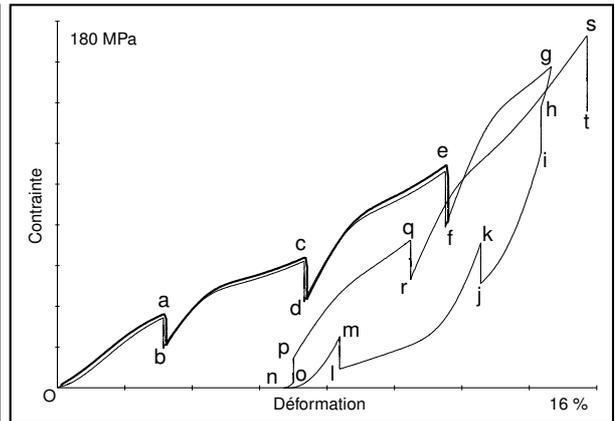


Fig. 8 – Résultats des essais *Gk37* (en gras) et *Gk38* (en fin) de traction ondulée avec relaxations ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} s^{-1}$).

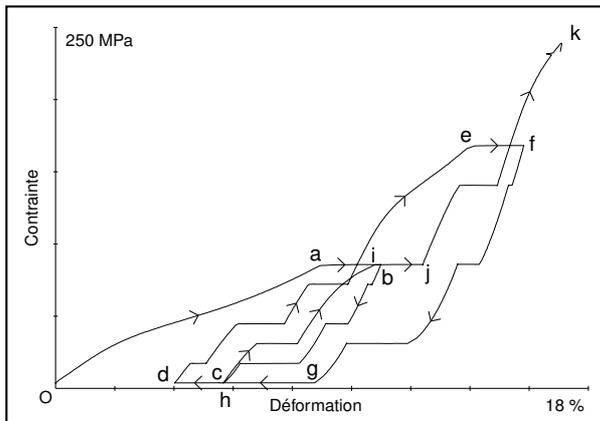


Fig. 9 – Résultat de l’essai *Gk14* de traction ondulée avec fluages ($\dot{\sigma} = 6,6 MPa/s$).

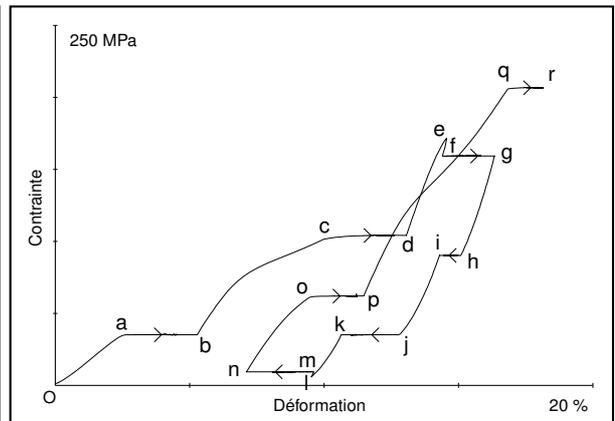


Fig. 10 – Résultat de l’essai *Gk36* de traction ondulée avec fluages ($\dot{\sigma} = 32,9 MPa/s$).

déformation sur la branche, qui précède la séquence de relaxation. De plus, l'intensité de variation de la contrainte semble être plus faible, pour les séquences de relaxation situées juste après une inversion, par rapport à celles, sur une branche du cycle charge-décharge, assez éloignées d'une inversion. L'essai *Gk38* (fig. 8) nous indique que cette intensité peut même s'annuler pour une relaxation située sur un point particulier d'une branche de charge ou de décharge après une inversion. En effet, on observe un changement de signe de la variation de la contrainte pour une relaxation située entre le point d'inversion et le point particulier de relaxation de contrainte nulle et une relaxation située au-delà de ce point particulier. Ce phénomène est mis en évidence par les relaxations *hi* et *op* de la figure 8. Les points, pour lesquels la relaxation s'annule, se situent alors sur la branche de décharge entre les relaxations *hi* et *jk*, et sur la branche de charge entre les relaxations *op* et *qr*. Après la relaxation, la recharge s'effectue avec une pente relativement élevée. Cette pente augmente avec la déformation, qui caractérise l'emplacement de la relaxation (trajets *bc* et *fg* sur la figure 8). A une déformation donnée, cette pente semble être constante quel que soit l'emplacement de la relaxation : courbe de première charge, branche de décharge et de recharge (fig. 7). Les recharges après une relaxation présentent un régime transitoire caractérisé par un rebond assez visible quel que soit l'emplacement de la relaxation au cours de l'histoire de chargement.

3.5 Essais de traction ondulée interrompue par des séquences de fluage

Ces essais sont contrôlés en vitesse de contrainte constante et interrompus par des séquences à contrainte constante durant lesquelles le matériau flue. Deux résultats typiques sont donnés par les figures 9 et 10. L'essai *Gk14* (fig. 9) comporte deux cycles de charge-décharge. L'essai *Gk36* ne comporte qu'un seul cycle de charge-décharge. De façon similaire aux relaxations, les fluages se traduisent par un sens d'évolution de la déformation, qui dépend de la position de la séquence de fluage sur la boucle d'hystérésis. L'essai *Gk36* confirme l'existence d'un point particulier sur la courbe de charge et sur la courbe de décharge pour lequel le comportement est non visqueux (sans fluage). En effet, la figure 10 montre une inversion du sens d'évolution de la déformation lors des fluages *fg* et *hi*, ainsi que lors des fluages *mn* et *op*. Les recharges après un fluage présentent aussi un régime transitoire caractérisé par un rebond, qui se manifeste de façon moins marquée que dans le cas des essais de relaxation (trajets *bc* et *pq* de la figure 10).

4 Conclusions

Des résultats typiques d'essais sur un matériau tissé ont été présentés. Une analyse plus approfondie de ces résultats permet de caractériser le comportement du matériau par ses propriétés telles que le comportement indépendant du temps, la saturation des effets visqueux et l'élasticité instantanée (G.Bles *et al.* 2006).

Références

- G.Bles, S.P.Gadaj, P.Guelin, W.K.Nowacki, A.Tourabi (2000), Thermomechanics of viscoplastic large strains of solid polymers, *Arch. Mech.*, **52**, 3, pp.397-427.
- G.Bles, S.P.Gadaj, W.K.Nowacki, A.Tourabi (2002), Experimental study of a PA66 solid polymer in the case of shear cyclic loading, *Arch. Mech.*, **54**, 2, pp.155-174.
- G.Bles (2002), Bases thermomécaniques de la modélisation du comportement des matériaux tissés et des polymères solides, *PhD Thesis*, Université Joseph Fourier - Grenoble.
- G.Bles, W.K.Nowacki, A.Tourabi (2006), On viscoelastoplastic constitutive pattern of fabric materials, *35th Solid Mechanics Conference*, Zakopane September 2006, Polish Academy of Science.