



HAL
open science

Matériaux composites soumis à de grandes vitesses de sollicitation

Bénédicte Bonnet, Alain Thionnet, Jacques Renard

► **To cite this version:**

Bénédicte Bonnet, Alain Thionnet, Jacques Renard. Matériaux composites soumis à de grandes vitesses de sollicitation. Matériaux 2006, 2006, Dijon, France. 10 p. hal-00144371

HAL Id: hal-00144371

<https://hal.science/hal-00144371>

Submitted on 3 May 2007

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.

**MATERIAUX COMPOSITES SOUMIS
A DE GRANDES VITESSES DE SOLLICITATION**

B. Bonnet*, A. Thionnet*,**, J. Renard*

*Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

Centre des Matériaux P.M. Fourt – BP 87 – 91003 Evry Cedex

benedicte.bonnet@ensmp.fr , alain.thionnet@ensmp.fr , jacques.renard@ensmp.fr

**Université de Bourgogne – BP 47870 – 21078 Dijon – France

RESUME

L'objet de ce travail est de modéliser la réponse à des sollicitations quasi-statiques et dynamiques de deux matériaux composites utilisés dans l'industrie automobile : un tissu verre/polypropylène et une matrice polypropylène renforcée de fibres courtes en verre. Pour ce faire, des essais mécaniques à différentes vitesses de sollicitation (de 10^{-4}s^{-1} à 100s^{-1}) ont été menés. La campagne expérimentale nous a permis d'identifier pour chacun des matériaux les phénomènes dissipatifs prépondérants et de quantifier leur part dans la déformation totale, en fonction de la vitesse. Nous proposons ensuite un modèle unifié de comportement permettant de répondre de manière cohérente aussi bien à des sollicitations quasi-statiques que dynamiques et valable pour les deux matériaux.

ABSTRACT

The objective of this work is to model the quasi-static and dynamic loading response of two composite materials which are used in the automobile industry : a woven fabric of commingled E-glass and polypropylene rovings and an injected short glass fibre polypropylene matrix. To do so, mechanical tests at different strain rates (from 10^{-4}s^{-1} to 100s^{-1}) have been performed. The series of tests which have been carried out have allowed the major dissipative phenomena for each material to be identified and to quantify their part in the total strain, as a function of strain rate. We then propose a unified behaviour model which describes, in a coherent manner, both quasi-static and dynamic loadings and which is suitable for both materials.

MOTS CLES : grande vitesse de déformation, polypropylène, fibres de verre, viscoélasticité, viscoplasticité, endommagement, modélisation.

KEYWORDS : high strain rate, polypropylene, glass fibre, viscoelasticity, viscoplasticity, damage, modelling.

INTRODUCTION

Dans le domaine automobile, économies d'énergie et limitations d'émissions de gaz polluants encouragent l'utilisation de matériaux légers. En particulier, les matériaux composites sont utilisés pour des pièces situées sous la carrosserie appelées «serveurs» (poutre d'absorption de chocs, quart-avants, doublures d'aile...). Elles doivent résister à des contraintes mécaniques plus ou moins sévères. Pour la réalisation de telles pièces, on peut utiliser les deux composites suivants :

- un tissu verre/polypropylène ;
- une matrice polypropylène chargée de fibres courtes.

Ces pièces sont soumises à des sollicitations quasi-statiques et dynamiques. Il est donc important de proposer des modèles de comportement capables de répondre correctement à des sollicitations de natures aussi différentes. Si l'on prend l'exemple de la poutre d'absorption de chocs, on étudie son comportement face à des chocs normalisés dits « parking » pour une vitesse du véhicule de 4-5 km/h, « assurance » pour une vitesse du véhicule de l'ordre de 15km/h et enfin « crash » pour une vitesse du véhicule de 64km/h. Lors de ces sollicitations, la vitesse de déformation varie localement dans l'ensemble de la structure de $10^{-1}s^{-1}$ à $10s^{-1}$ avec un maximum au point d'impact qui peut atteindre $1000s^{-1}$ (Wolff, 1991). Afin d'identifier les phénomènes dissipatifs au sein des matériaux et de mieux comprendre leur évolution avec la vitesse de sollicitation, nous avons réalisé différents essais mécaniques, notamment de traction à vitesse rapide. La campagne expérimentale nous a permis de quantifier la part des différents phénomènes dissipatifs dans la déformation totale, en fonction de la vitesse. Elle nous a servi de base pour l'élaboration d'un modèle macroscopique de comportement prenant en compte des phénomènes de viscosité, de plasticité et d'endommagement et qui répond de manière cohérente aussi bien à des sollicitations quasi-statiques que dynamiques.

MATERIAUX ET EPROUVETTES

Le premier matériau étudié est un tissu satin 4/1 verre-polypropylène avec une proportion de fibres de verre de 60%. Les éprouvettes ont été découpées dans des plaques élaborées par thermoformage à partir d'un empilement de trois plis de tissu, orientés de manière identique. Le matériau étudié est donc orthotrope. Afin de caractériser complètement son comportement, nous avons découpé des éprouvettes rectangulaires (équipées de talons verre-résine) selon différentes orientations : 0° (sens chaîne), 90° (sens trame) et 45° .

Le deuxième matériau étudié est une matrice polypropylène chargée à 30% en masse de fibres de verre coupées (de longueur moyenne 1,2mm). Par la suite on mentionnera ce matériau sous l'abréviation PP-FVC. Ce matériau est mis en forme par injection. Ce procédé est à l'origine de l'orthotropie macroscopique du matériau : près des parois du moule d'injection, les fibres s'orientent dans le sens de l'écoulement tandis qu'à cœur, les fibres s'orientent perpendiculairement à l'écoulement. On parle ainsi d'une structure de type «cœur-peau» . Les éprouvettes de caractérisation, cette fois-ci en forme d'haltère, ont été découpées à 0° , 90° et 45° par rapport à la direction principale d'écoulement.

Pour les deux matériaux, les plaques dont sont issues les éprouvettes sont minces. Nous cherchons donc à modéliser le comportement des matériaux sous l'hypothèse des contraintes planes.

ETUDE EXPERIMENTALE

Afin d'identifier les phénomènes dissipatifs au sein des matériaux et de mieux comprendre leur évolution avec la vitesse de sollicitation, nous avons réalisé différents essais (charge-décharge, traction, compression, traction-compression) avec des vitesses de déformation allant de 10^{-4}s^{-1} (sollicitations quasi-statiques) à 100s^{-1} . Les essais les plus lents (jusqu'à 10^{-1}s^{-1}) et à vitesses intermédiaires (essais à 10^{-1}s^{-1} et 1s^{-1}) ont été réalisés sur une machine classique de traction mécanique ou une machine hydraulique de fatigue. Les essais de vitesse plus élevée ont, eux, nécessité l'utilisation d'une machine de traction hydraulique à vitesse rapide.

Analyse de l'essai de traction à vitesse rapide

La machine de traction utilisée peut atteindre des vitesses de traction jusqu'à $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour une capacité maximale de 2000 daN. L'acquisition du signal de charge est réalisée à l'aide d'une cellule de charge à jauges conçue au Centre des Matériaux de l'ENSMP. Les déformations des éprouvettes sont mesurées dans le sens de la traction et dans le sens transverse à la traction à l'aide de jauges de déformation collées en regard l'une de l'autre sur chaque face de l'éprouvette. A son extrémité haute, l'éprouvette est arrimée, proche de la cellule de charge. A l'extrémité basse de l'éprouvette, le mors est relié à la tige du lanceur. L'essai se décompose de la façon suivante :

- § le corps du lanceur, relié au vérin, accélère jusqu'à atteindre une vitesse de déplacement constante (course de l'ordre de 180mm) ;
- § il vient ensuite accrocher la tige : il y a alors choc et transmission des efforts à l'éprouvette. Celle-ci, après un régime transitoire, sera soumise à une vitesse de sollicitation constante jusqu'à rupture .

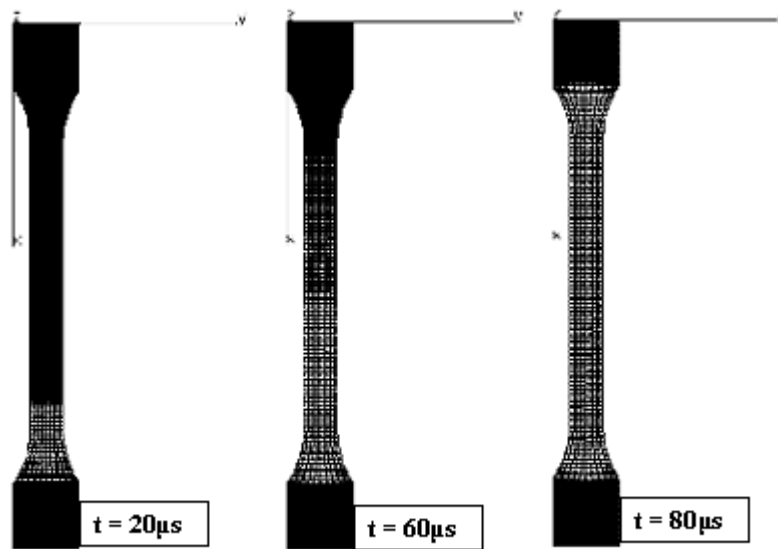


Figure 1 : Simulation d'un essai de traction à $100s^{-1}$.
 Représentation de la contrainte dans la direction de sollicitation.
Numerical simulation of a tensile test at $100 s^{-1}$.
Tensile stress in the loading direction.

Afin de réduire les effets structuraux et d'amortir l'onde de choc, un joint d'amortissement a été placé entre la tige et le corps du lanceur (Pardo , 2001). Lors de la mise en charge, les effets d'inertie engendrent une non-uniformité des champs de contrainte et de déformation au sein de l'éprouvette. Afin de pouvoir justifier que la charge et les déformations mesurées nous donnent accès au comportement du matériau, nous avons réalisé une simulation numérique de l'essai en tenant compte des effets d'inertie. Les conditions aux limites pour la simulation sont conformes à la sollicitation expérimentale. Toutefois, on suppose que la réflexion de l'onde de contrainte aux extrémités de l'éprouvette est totale. L'éprouvette est donc encastree à une extrémité et un déplacement est imposé à l'autre extrémité. Durant le régime transitoire, la vitesse du déplacement imposé varie proportionnellement au temps et demeure ensuite constante. La durée du régime transitoire a été estimée entre $10^{-5}s$ et $10^{-4}s$ à l'aide des courbes $\epsilon_L=f(t)$. Pour les essais à $10s^{-1}$, la durée du régime transitoire est inférieure à 5% de la durée de l'essai. En revanche, pour les essais à $100s^{-1}$, on peut atteindre 50%. Sur la Figure 1 est représentée la simulation d'un essai de traction sur le PP-FVC à $100s^{-1}$ avec un régime transitoire de $10^{-4}s$. La durée de l'essai est de $250\mu s$. Les champs de contrainte sont donnés pour trois dates différentes. On observe que s'ils sont hétérogènes au début de l'essai, ils tendent à s'uniformiser. Cela montre qu'en début d'essai, il y a un décalage entre la mesure de la charge et celle de la déformation. Toutefois cela correspond à une zone de la courbe $\sigma_L=f(\epsilon_L)$ où le comportement du matériau est quasi-élastique. On observe ensuite pour $t>75\mu s$, l'uniformité des champs de contrainte et de déformation dans la zone utile qui nous donnent accès au comportement du matériau.

Résultats expérimentaux pour le tissu

Pour les éprouvettes découpées dans le sens chaîne, les essais ont été uniquement menés à faibles vitesses de sollicitation justifiés par le fait qu'un comportement élastique linéaire avec rupture de fibres a été mis en évidence : l'influence de la vitesse est donc absente. Pour les éprouvettes découpées dans le sens trame, nous observons des phénomènes visqueux mis en évidence par les essais de charge-décharge (Fig. 3), notamment en compression, qui tendent à saturer d'autant plus rapidement que la vitesse de sollicitation augmente (Fig. 3 b). La dissymétrie du comportement en traction et en compression (Fig. 3 a) est due à de l'endommagement qui apparaît en traction par micro-fissuration (fissuration transverse) et rupture de fibres. L'endommagement a été identifié par analyses microscopiques (Fig. 2) mais aussi par analyse des ruptures de pente lors des essais de charge-décharge.

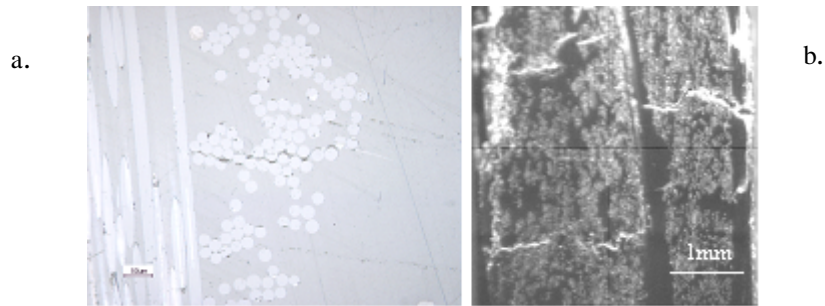


Figure 2 : Fissuration intra-laminaire. Observations par microscopie optique
Intra-laminate microcracks. Observations by optical microscopy.

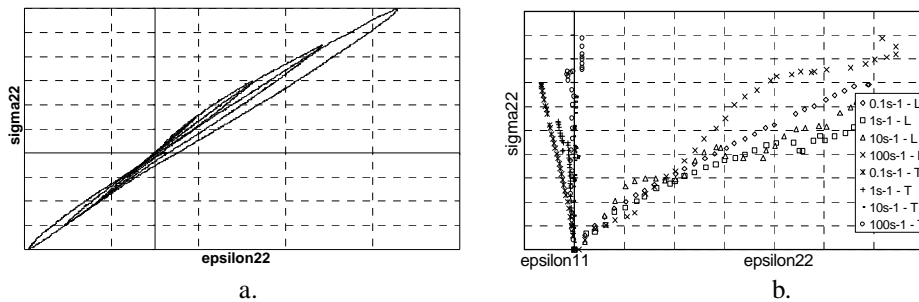


Figure 3 : Comportement du tissu dans le sens trame. Essai de traction compression à 1MPa/s (a.). Essais de traction à différentes vitesses de déformation (b.).
Behaviour of the woven fabrics in the weft direction.
Tensile compressive test at 1MPa/s (a.) Tensile tests at different strain rates (b.).

Pour le comportement en cisaillement (Fig. 4), identifié à partir des essais sur éprouvettes découpées à 45°, nous avons fait des observations similaires à celles pour le comportement dans le sens trame avec en plus l'apparition de déformations irréversibles dues au phénomène de viscoplasticité.

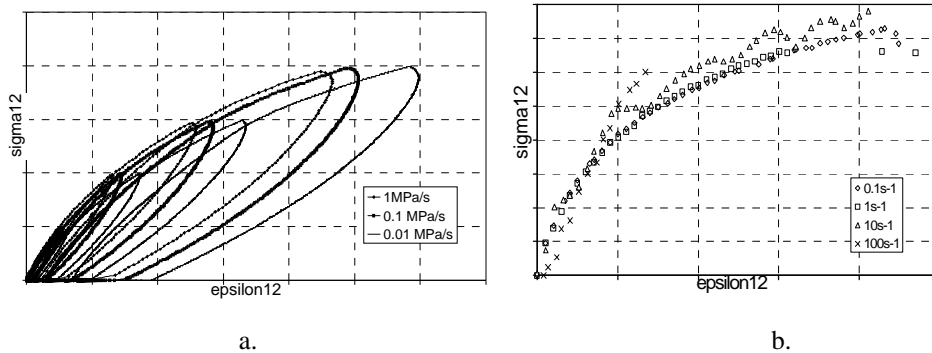


Figure 4 : Comportement du tissu en cisaillement. Essais de charge-décharge à différentes vitesses de charge (a.). Essais de traction à différentes vitesses de déformation (b.).

Shear behaviour of the woven fabrics. Loading/unloading tests at different stress rates (a.). Tensile tests at different strain rates (b.)

Résultats expérimentaux pour le PP-FVC

Pour les éprouvettes de PP-FVC découpées à 0° , 90° et 45° , nous observons des comportements de même nature mais sensiblement différents (Fig. 5, Fig. 6). Le comportement est en effet davantage rigide dans la direction d'injection, parallèlement à laquelle sont orientées la plupart des fibres. Les essais de charge-décharge et de traction à différents vitesses nous ont permis de conclure que la non-linéarité du comportement du matériau PP-FVC était due aux phénomènes de viscoélasticité et de viscoplasticité. En effet, l'endommagement (décohésion fibres/matrice, fissuration de la matrice...), qui pourrait aussi expliquer cette non-linéarité, n'est pas mis en évidence de façon significative par les observations de microscopie optique (observations sur échantillons prélevés sur des éprouvettes rompues, hors de la zone de rupture) ni par l'étude des faciès de rupture qui a montré une bonne adhésion fibres-matrice. Même si l'endommagement existe au delà d'un certain chargement (Ségaré et al, 2003), il est localisé dans la zone de rupture et n'affecte que très tardivement le comportement macroscopique.

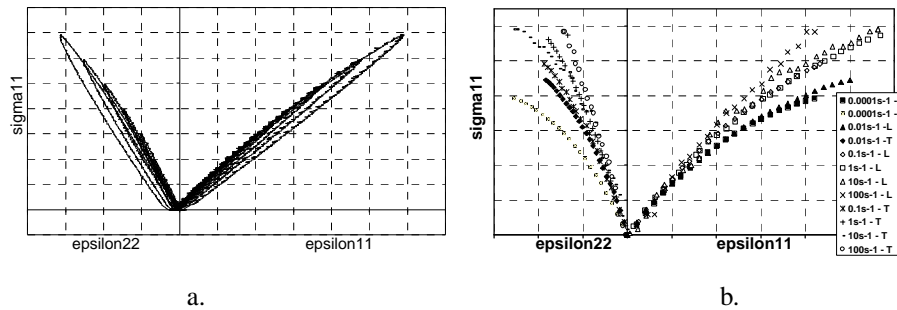


Figure 5 : Comportement du PP-FVC dans la direction d'injection. Essai de charge-décharge à 1MPa/s (a.). Essais de traction à différentes vitesses de déformation (b.).
Behaviour of the fibre reinforced matrix composite in the injection direction. Loading/unloading test at 1MPa/s (a.). Tensile tests at different strain rates (b.).

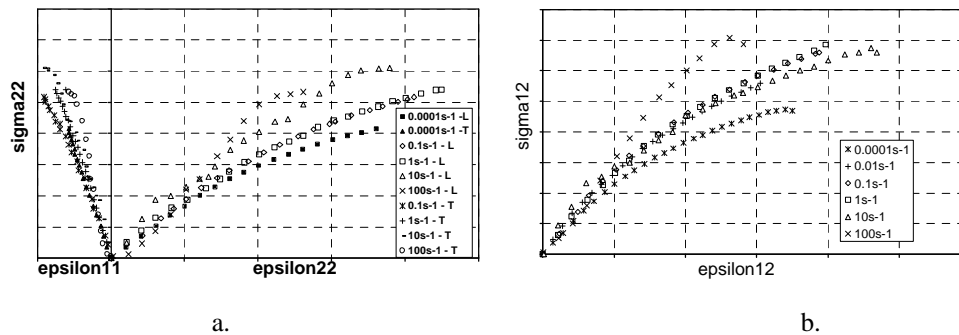


Figure 6 : Comportement du PP-FVC perpendiculairement à la direction d'injection (a.) et en cisaillement (b.).
Behaviour of the fibre reinforced matrix composite at 90° to the injection direction (a.) and in the shear direction (b.).

MODELISATION DU COMPORTEMENT

Bien que constitués des mêmes composants, les matériaux tissé et PP-FVC ont des comportements très différents. Ces différences tiennent au caractère fortement, respectivement faiblement, anisotrope de l'un et l'autre. Les directions de forte anisotropie du tissu (celles alignées avec les brins de chaîne et de trame) empêchent le caractère viscoélastique de la matrice de trop se développer. Evidemment, ce n'est plus le cas pour le matériau PP-FVC, bien moins anisotrope. D'autre part, l'endommagement joue un rôle prépondérant dans la non-linéarité du comportement du tissu alors qu'il est négligeable pour le PP-FVC.

Cependant, même si les phénomènes dissipatifs ne sont pas les mêmes pour ces deux matériaux, nous proposons un modèle unique qui englobe la prise en compte des phénomènes de viscosité, de plasticité et d'endommagement, chacun d'eux étant rendus actifs ou non en fonction du jeu de coefficients identifié pour le matériau considéré. Ce

modèle présente également l'avantage de pouvoir être utilisé aussi bien lorsque les sollicitations sont quasi-statiques que dynamiques.

Le modèle retenu est basé sur une partition de la déformation totale en trois déformations distinctes : élastique endommageable, viscoélastique et viscoplastique.

$$e = e^{end} + e^{ve} + e^{vp}$$

Nous faisons également l'hypothèse d'une partition en trois du potentiel d'état sur le même schéma que celui de la partition de la déformation :

$$r\Psi = r\Psi^{end} + r\Psi^{ve} + r\Psi^{vp}$$

Le modèle d'endommagement est rendu actif uniquement pour le tissu. Il décrit la multiplication des fissures dans le pli par fissuration transverse dans les torons de chaîne ainsi que la rupture de fibres. Son écriture s'inspire de la modélisation de l'endommagement au sein d'un unidirectionnel (Thionnet et al, 1999). La modélisation de la viscoélasticité est basée sur l'écriture anisotrope du modèle de Zener (Le Bassier Y., 2002). Enfin, nous utilisons la théorie de la viscoplasticité classique avec un écoulement de Norton, un critère anisotrope et un écrouissage cinématique non linéaire anisotrope (Nouailhas , 1992).

RESULTATS DE L'IDENTIFICATION

Si plusieurs modèles pour matériaux composites soumis à différentes vitesses de sollicitation ont été développés, bien souvent les auteurs distinguent basses et grandes vitesses de sollicitation pour la modélisation. On trouve ensuite des modèles élasto-plastiques endommageables qui ne tiennent pas compte des effets visqueux (Johnson, 2001). D'autres modèles (Thiruppukuzhi et al, 2002) sont davantage dédiés à la description du comportement non-linéaire hors-axe d'un unidirectionnel. Les possibilités du modèle présenté ci-dessus sont nombreuses : il présente l'avantage d'être valable pour une grande plage de vitesses de déformation, de cumuler endommagement et viscoplasticité et enfin de prendre en compte l'anisotropie des matériaux.

Identification du comportement pour le tissu

La modélisation de l'effet unilatéral du dommage nous permet de rendre compte de la dissymétrie du comportement en traction et en compression dans le sens trame (Fig. 7. a. b.). Toujours dans cette même direction, l'identification de la loi viscoélastique nous permet de traduire la saturation des phénomènes visqueux avec la vitesse de sollicitation.

D'autre part, le modèle permet de bien décrire la décharge (Fig. 7 c. d.).

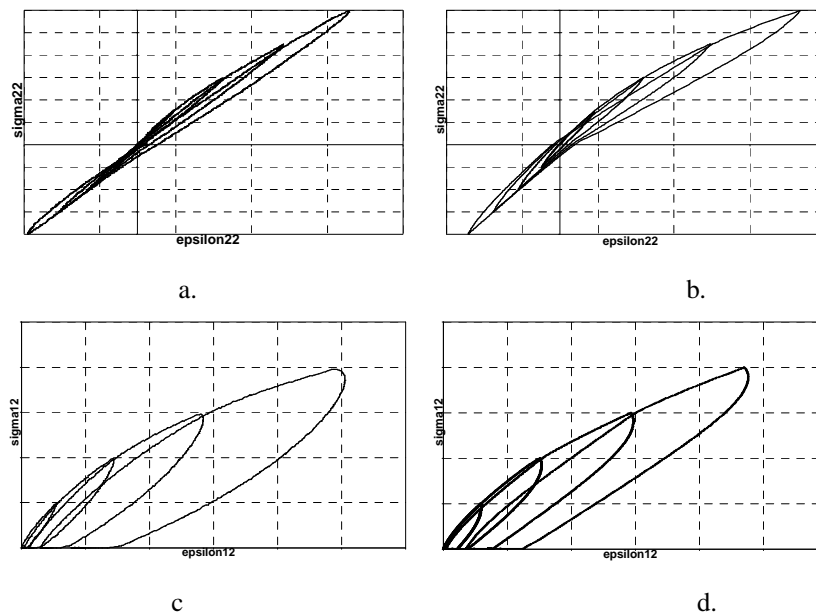


Figure 7 : Comportement du tissu. Comparaisons essais-simulations.
 Essai de traction-compression dans le sens trame (a.). Simulation (b).
 Essai de charge-décharge en cisaillement (c.). Simulation (d).
Behaviour of the woven fabrics. Comparisons between tests and simulations.
Tensile-compressive test in the weft direction (a.). Simulation (b)
Shear Loading/unloading test (c.). Simulation (d.)

Identification du comportement pour le PP-FVC

Enfin le comportement en traction à différentes vitesses de déformation est bien rendu. On observe la rigidification progressive du comportement. Les phénomènes visqueux saturent progressivement : ce sont les phénomènes viscoélastiques qui saturent en premier lieu puis les phénomènes viscoplastiques.

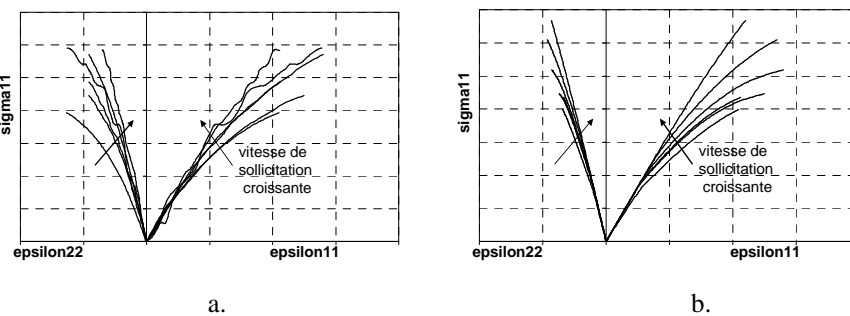


Figure 9 : Comportement du PP-FVC dans la direction d'injection. Essais de traction de $10^{-4}s^{-1}$ à $100s^{-1}$. a. Essais - b. Résultats de l'identification .
Behaviour of the fibre reinforced matrix composite in the injection direction. Tensile tests at $10^{-4}s^{-1}$ to $100s^{-1}$. a. Tests – b. Results of the identification..

CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une étude expérimentale du comportement de deux matériaux composites pour des vitesses de sollicitation variant de 10^{-1}s^{-1} à 100s^{-1} ainsi qu'un modèle de comportement permettant de rendre compte des différents phénomènes dissipatifs observés lors des essais. L'identification du modèle permet une bonne corrélation entre les essais et leur simulation. Des travaux sont actuellement en cours pour valider la loi de comportement sur un calcul structurel. Enfin, nous sommes attachés ici à décrire le comportement des matériaux. Une étude approfondie de l'influence de la vitesse de sollicitation sur la rupture permettrait de compléter le modèle.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la société PLASTIC OMNIUM AUTO EXTERIEUR d'avoir financé cette étude ainsi que la SME où ont été réalisés les essais de traction à vitesse rapide.

BIBLIOGRAPHIE

- Johnson A.F., 2001. "Modelling fabric reinforced composite under impact loads", *Composites*, Part A 32, pp. 1197-1206.
- Le Basser Y., 2002. "Lois de comportement de composites à matrice thermoplastique renforcée de fibres courtes", Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Nouailhas D., Freed A.D., 1992. "A viscoplastic theory for anisotropic materials", *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 114, pp. 97-104.
- Pardo S., 2001. "Tenue d'assemblage de composites sous sollicitations dynamiques", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- Ségard E., Benmedakhene S., Laksimi A., Daï D., 2003. "Damage analysis and the fibre-matrix effect in polypropylene reinforced by short glass fibres above glass transition temperature", *Composite structures*, v.60, pp.67-72.
- Thionnet A., Renard J., 1999, "Modelling unilateral damage effect in strongly anisotropic materials by the introduction of the loading mode in damage mechanics", *International Journal of Solids and Structures*, v. 36, pp. 4269-4287.
- Thiruppukuzhi S.V., Sun C.T., 2002. "Models for the strain-rate-dependent behavior of polymer composites", *Composites Science and Technology*, v. 61, pp. 1-12.
- Wolff C., 1991. "Approche thermomécanique et modélisation du comportement en absorption d'énergie de tubes composites", Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.