

# Comportement des matériaux composites SMC-R sous diverses sollicitations

## *Behaviour of composite materials SMC-R under diverse loads*

Abir AL-MAGHRIBI<sup>1</sup>, Frédéric LACHAUD<sup>2</sup>

1 : Département de Mécanique des structures et Matériaux ...  
ISAE 1 Place Emile Blouin, 31056 TOULOUSE  
e-mail : aalmaghr@isae.fr, Frederic.Lachaud@isae.fr

### Résumé

L'objectif de cette étude est de modéliser le comportement de structures composites à fibres courtes de type SMC-R sous différents types de sollicitations.

La première partie de l'étude présente l'analyse expérimentale de comportement du matériau. Des essais de caractérisations des SMC-R sous diverses sollicitations ont été réalisés afin de mettre en place de nouvelles lois de comportement. Les sollicitations sont de types traction simple, traction cyclique Pure, compression cyclique pure, couplage de traction-compression, cisaillement simple, cisaillement cyclique et couplage cisaillement –traction.

La deuxième partie présente l'étude numérique d'un modèle de comportement élastoplastique endommageable développé lors de précédentes études. Ce modèle a été implanté dans un code de calcul implicite et explicite par éléments finis (SAMCEF).

En fin, une comparaison a été faite entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux obtenues à partir de la simulation numérique par éléments finis.

### Abstract

The objective of this study is to investigate the behaviour of short fibers composite structures of type SMC-R under various loads.

The first part of the study presents the experimental analysis of material behaviour. Characterizations tests of the SMC-R were realized in order to identify non-linear behaviour. The tests realized are tensile test, compressive test and shearing test.

The second part presents the numerical study of damage elastoplastic behaviour developed during previous studies. This behaviour was coded into explicit calculation by finite elements (SAMCEF).

Finally, a comparison is made between the results obtained experimentally and those obtained from an explicit numerical simulation.

**Mots Clés** : Composite SMC-R, Endommagement, Plasticité.

**Keywords** : Composite, Damage, Plasticity.

## 1. Etude expérimentale

### 1.1 Matériau étudié

Le matériau à l'origine de cette étude est le SMC-R25, c'est un matériau préimprégné SMC (Sheet Molding Compound) constitué principalement d'une matrice polyester chargé de particules d'origine minérale (carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) et renforcées par des mèches de fibres de verre courtes E distribuées aléatoirement dans le plan des plaques. La signification « 25 » signifie que la fraction en poids de fibres est de 25%. Une dissolution à l'acide sulfurique a été réalisée au laboratoire afin de connaître le taux volumique de fibres ( $V_f=0.17$ ).

### 1.2 Essai Traction et Compression

#### 1.2.1 Expérimentation

Les éprouvettes d'essais ont été découpées dans des plaques réalisées et fournies par la société MENZOLIT. La partie utile de l'éprouvette de traction est  $100 \times 20 \text{ mm}^2$ , celle de compression est  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  (Fig. 1).

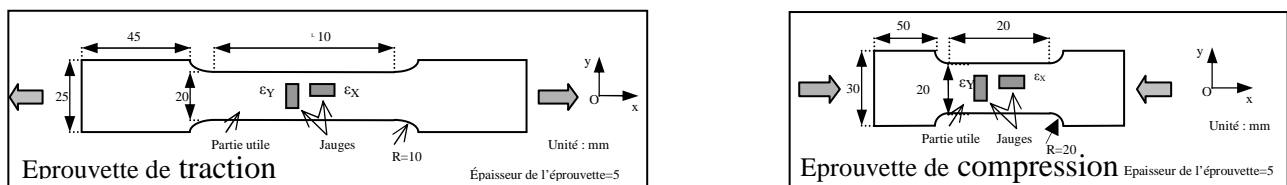


Fig. 1. Caractéristiques dimensionnelles de l'éprouvette de traction et de compression.

Les essais de traction et de compression sont réalisés à l'aide d'une machine dynamique hydraulique INSTRON à déplacement imposé de  $2 \text{ mm/min}$ . Chaque éprouvette est équipée de deux jauges de déformation collées sur une même face, au centre de la partie utile. L'enregistrement de l'effort généré par la machine d'essai et les deux valeurs de déformation, est effectué à l'aide d'un système d'acquisition NICOLET couplé au SYSTEME 2400 pour le conditionnement des signaux jauges. Les éprouvettes sont sollicitées pendant l'essai selon le sens longitudinal de l'échantillon. Tous les essais ont été effectués à température ambiante.

#### 1.2.2 Résultats expérimentaux

La figure 2 montre les résultats expérimentaux d'un essai de traction cyclique et un essai de compression cyclique. Le comportement en traction est bilinéaire [1] avec des déformations résiduelles importantes dues aux blocages des fissures lors des décharges. Le comportement en traction et en compression est très différent. En traction, on peut marquer deux pentes quasiment linéaires distinctes (élastique et plastique) au niveau de l'enveloppe de la courbe de comportement ; ce n'est pas le cas du comportement en compression. De plus, la contrainte maximale en compression est deux fois supérieure à celle en traction pour une déformation à rupture quasi-identique ( $\epsilon=1.36\% \pm 0.3$ ). Cependant, les déformations résiduelles sont bien plus faibles en compression (traduisant des endommagements faibles).

Le tableau 1 présente un résumé des données expérimentales. Le module d'élasticité du matériau est presque identique en traction et en compression.

	Module d'élasticité [MPa]	Contrainte à rupture [MPa]	Déformation à rupture [%]
Traction cyclique	$11733 \pm 100$	$60 \pm 5$	$1.33 \pm 0.02$
Compression cyclique	$12603 \pm 200$	$126.7 \pm 6$	$1.39 \pm 0.01$

Tab. 1. Les données expérimentales des essais de traction et de compression.

Les valeurs données dans le tableau 1, sont quasiment identiques à celles obtenues lors d'essais monotones.

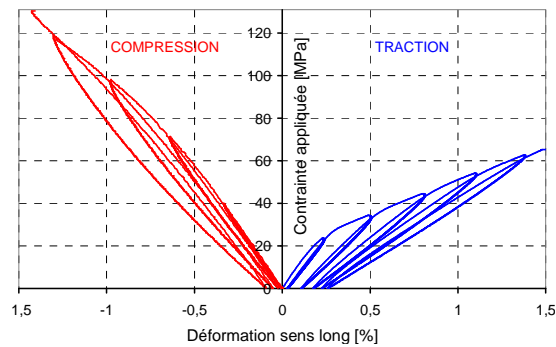


Fig. 2. Comportement du matériau en traction cyclique et en compression cyclique.

Les essais sont suivis par des observations au MEB afin de montrer la différence entre l'endommagement créé en traction et celui créé en compression (Fig. 3). L'observation au MEB après la rupture révèle que la rupture en traction introduite par des microfissurations de la matrice se propage pour finir par décohésions des interfaces fibre- matrice. Le mode de rupture en compression est un mode de cisaillement hors plan inter mèches, avec la présence de macro fissures qui apparaissent entre les amas de mèches de mêmes orientations. Par comparaison au mode de rupture en traction, il n'y a que très peu de rupture des interfaces fibre-matrice.

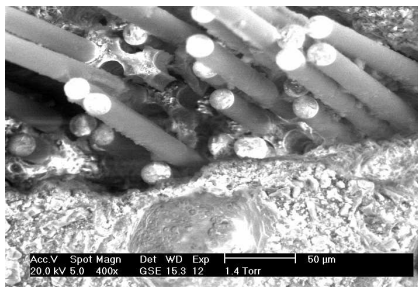


Fig. 3a. Rupture en traction.



Fig. 3b. Rupture en compression.

Fig. 3. Observations des principaux endommagements du SMC.

### 1.2.3 Identification de l'endommagement et du pseudo plasticité en traction et en compression

L'identification des lois d'endommagement à partir des essais sur SMC-R a été effectuée en utilisant le modèle du LMT Cachan. Ce modèle a été développé par Ladevèze [2] et appliqué par la suite sur une multitude de matériaux différents. Tout d'abord l'endommagement est caractérisé par la perte de rigidité du matériau. Pour chaque cycle de charge-décharge il est donc possible de déterminer  $Y(d)$ , paramètre d'énergie, et l'endommagement  $d$  correspondant. La plasticité est révélée par l'apparition de déformations résiduelles. La figure 6 présente les courbes d'endommagement et de pseudo plasticité en traction pure et en compression pure.

## 1.3 Essai de Traction-Compression couplées

Les essais de traction-compression couplés ont été réalisés sur des éprouvettes identiques à celles de compression. La figure 4 montre un essai couplé ; une comparaison est réalisée sur l'enveloppe des essais purs de traction et de compression. La première constatation est que ces enveloppes de comportement sont quasi identiques à celle des essais de traction-compression couplées si ce n'est un décalage en déformation de la partie compression dû aux déformations résiduelles [3].

La figure 5 montre le premier cycle de charge-décharge de l'essai complet. Concernant la partie en traction, le comportement est bilinéaire. Lors du passage traction-compression, on note une reprise de rigidité dès que la déformation devient négative ; cette reprise de rigidité se faisant progressivement. Cette transition est attribuée à la fermeture des fissures créées en traction (perte de raideur visible en traction, déformation résiduelle en traction). Par la suite le comportement devient linéaire jusqu'à un certain niveau de déformation (avant endommagement/plasticité en compression). Le module d'élasticité, pouvant être calculé alors sur la partie linéaire, est identique à celui calculé lors d'un essai de compression pure (pour le premier cycle). Enfin, la décharge en compression montre une perte de raideur avec un passage progressif de compression-traction non linéaire attribué à la réouverture des fissures de traction (voir celles de traction plus celles créées en compression).

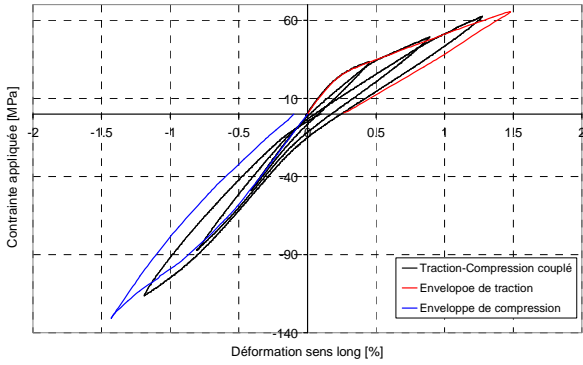


Fig. 4. Comportement du matériau en couplage de traction-compression cyclé  $\sigma=f(\epsilon)$

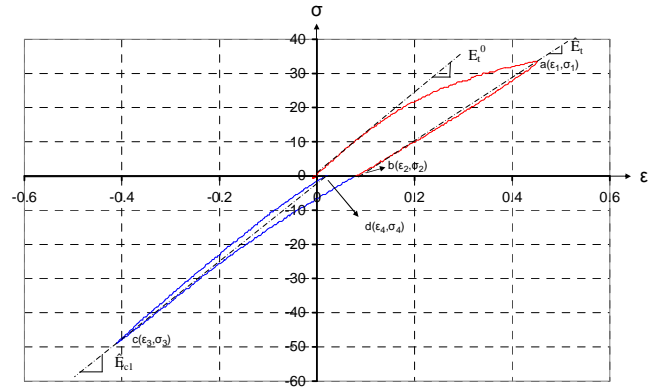
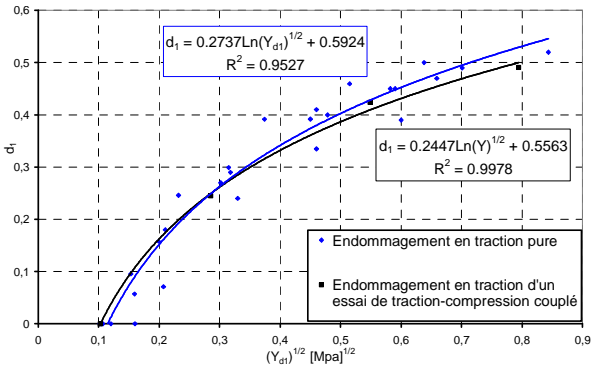


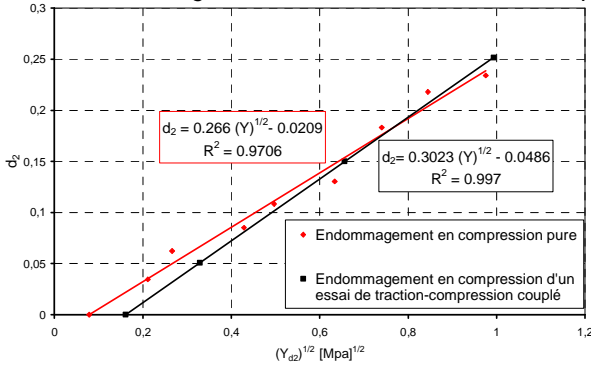
Fig. 5. Premier cycle de courbe du comportement matériau en traction-compression.

### 1.3.1 Identification de l'endommagement et du pseudo plasticité en traction-compression couplées

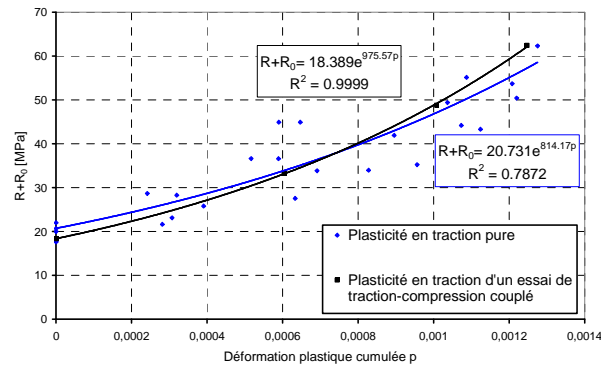
Par la suite, l'objectif est, pour ces essais, de montrer s'il existe un couplage significatif de traction/compression (couplage en termes d'endommagement et de pseudo plasticité). Pour ce faire, les courbes d'endommagement et de pseudo plasticité obtenues lors des essais de traction-compression sont comparées à celle obtenues pour les essais en sollicitation pure (Fig. 6).



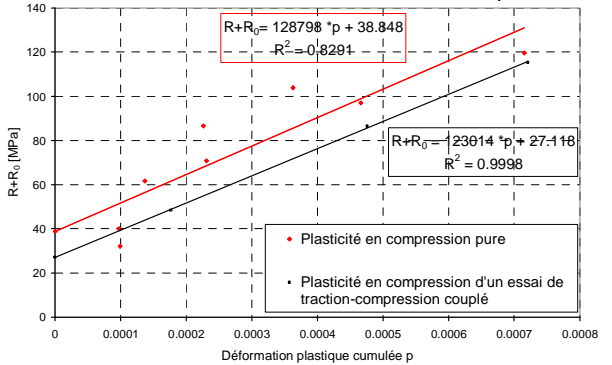
Endommagement en traction et en traction couplée.



Endommag. en compression et en compression couplée.



Plasticité en traction et en traction couplée.



Plasticité en compression et en compression couplée.

Fig. 6. Comparisons de l'endommagement et la plasticité, entre les essais de traction pure, compression pure et les essais de traction-compression couplées.

Concernant la comparaison des paramètres (endommagement, plasticité) de traction, on ne note pas des différences significatives. Il semble tout de même que pour une même contrainte, l'endommagement résultant d'un passage en compression entraîne une légère augmentation de l'endommagement en traction. L'influence du passage en compression après une sollicitation en traction reste tout de même négligeable. Le mode d'endommagement en compression étant différent de celui en traction, le couplage reste faible.

Concernant la comparaison des paramètres (endommagement, plasticité) de compression, on ne note pas non plus de différences significatives même si les courbes de plasticité semblent différentes, elles restent proches, et surtout dans l'ordre de grandeur des écarts que l'on peut avoir entre deux essais identiques.

## 1.4 Essai de Traction-Cisaillement couplés

Le montage utilisé dans cette partie est le montage dit « ARCAN » [4]. La figure 7 montre un schéma du montage Arcan avec son éprouvette au centre. Ce montage permet de réaliser des essais de traction pur lorsque l'angle  $\alpha$  est à  $0^\circ$ , de cisaillement pur lorsque  $\alpha$  est à  $90^\circ$  et de traction-cisaillement couplé lorsque  $\alpha$  est compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Dans ce dernier cas, le rapport entre les contraintes de traction et de cisaillement est fonction de l'angle  $\alpha$  et de la charge appliquée. Les valeurs moyennes de la contrainte normale  $\sigma_N$  et la contrainte tangentielle  $\sigma_T$  au centre de section S, s'expriment à partir de l'angle de sollicitation  $\alpha$  et de la force F. Les éprouvettes sont équipées d'une rosette de jauge de déformation collée sur une face comme indiqué figure 7. La déformation de cisaillement est obtenue par la somme des deux jauges placées à  $45^\circ$ . La déformation de traction est obtenue par la jauge placée à  $0^\circ$ . La charge a été appliquée en utilisant une machine de traction INSTRON de capacité 100 KN. La mise en charge est réalisée à 0.5 mm/minute. Les décharges sont contrôlées à 0.1 KN/minute.

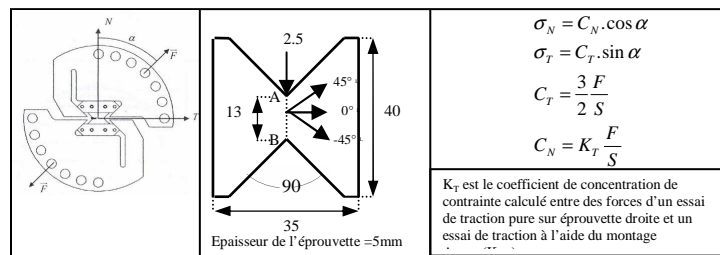


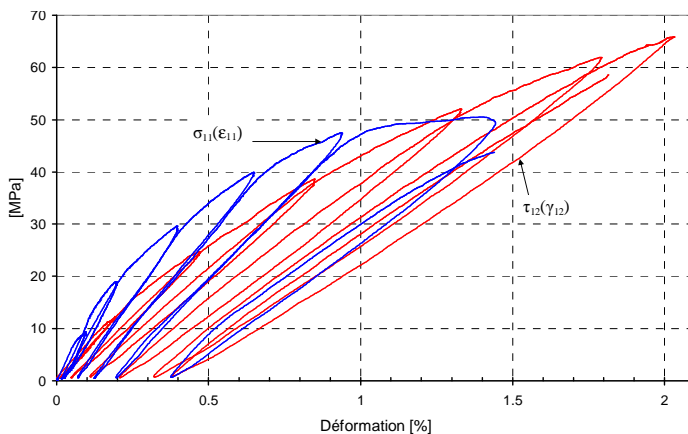
Fig. 7. Principe de l'essai Arcan.

### 1.4.1 Comportement en cisaillement sous chargement bi-axial de traction-cisaillement

#### 1.4.2

La campagne d'essais de traction-cisaillement n'a été réalisée que pour un angle  $\alpha=45^\circ$ .

La figure 8 montre la réponse en cisaillement et en traction. La rupture a été obtenue en traction (contrainte à rupture en traction plus faible que celle en cisaillement plan). Le tableau 2 présente les valeurs expérimentales calculées d'un essai de couplage traction-cisaillement.



$E_{11}^0$ (MPa)	$G_{12}^0$ (MPa)	$\sigma_{11}^R$ (Mpa)
13120.2	6671.49	50.6
$\epsilon_{11}^R$ (%)	$\tau_{12}^R$ (Mpa)	$\gamma_{12}^R$ (%)
1.44	65.4	2.018

Fig. 8. Comportement du matériau SMC en cisaillement-traction couplés.

Tab.2. Caractéristiques mécaniques obtenues à partir d'un essai de traction-cisaillement couplés

### 1.4.2 Identification de l'endommagement et du pseudo plasticité en traction-cisaillement couplés

L'identification de l'endommagement et du pseudo plasticité en traction-cisaillement couplés exige de déterminer les paramètres principaux d'endommagement ( $d$ ,  $Y(d)$ ) et les termes de couplage de l'endommagement ( $b$  eq. 1) et de la plasticité ( $a^2$  eq. 2) [5]. La figure 9 montre les courbes de l'endommagement et de pseudo plasticité en traction-cisaillement couplés.

$$\text{Rapport des rigidités : } b = \frac{\tilde{E}_{11}}{\tilde{G}_{12}} = 1.96 \quad \text{eq. 1}$$

$$\text{Couplage de plasticité : } a^2 = \frac{\epsilon_{11}^p (1 - d_{11})^2}{\gamma_{12}^p (1 - d_{12})^2} = 0.45 \quad \text{eq. 2}$$

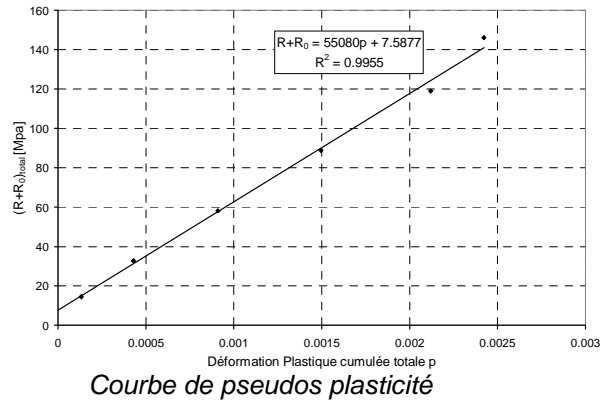
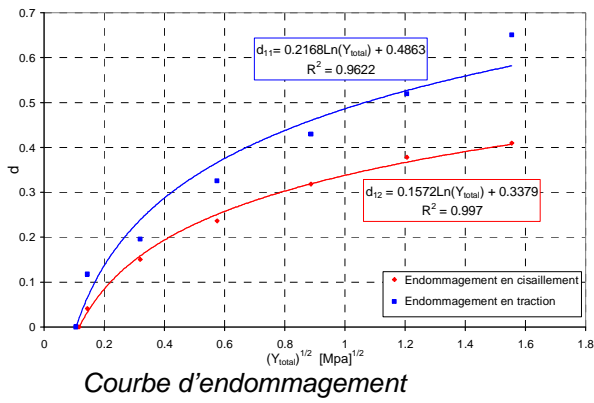


Fig. 9. Courbes de l'endommagement et de la plasticité en traction-cisaillement couplés.

La figure 10 montre les faciès de rupture d'une éprouvette soumise aux sollicitations de traction-cisaillement. Comme pour les essais de traction, beaucoup de fibres apparaissent à nues indiquant des ruptures de l'interface fibre-matrice. On peut même observer des mèches entières déchaussées.

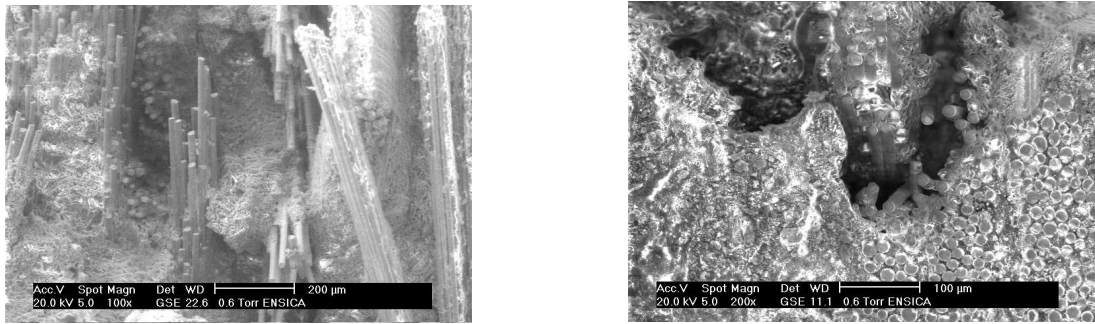


Fig. 10. L'analyse microscopique du faciès de rupture d'une éprouvette sollicitée en traction-cisaillement.

## 2. Etude numérique

L'étude numérique a été réalisée en implémentant les lois de comportement identifiées dans l'étude expérimentale précédente, dans un code de calculs par éléments finis SAMCEF, sous forme de routines fortran.

Le modèle micromécanique utilisé dans cette étude est détaillé dans [5]. Ce modèle est construit sur la base d'une méthode d'homogénéisation de Mori et Tanaka. Cette approche est la mieux adaptée à l'estimation des propriétés élastiques du matériau étudié. Le détail des lois d'endommagement et de plasticité est donné dans les paragraphes suivants :

### 2.1 Modélisation du comportement en traction et en compression

Le maillage des éprouvettes utilise des éléments volumiques de degré 2 (3 d.d.l par nœud). La partie de l'éprouvette serrée dans les mors hydrauliques de la machine d'essais n'est pas modélisée. Un côté du modèle est fixé, l'autre est sollicité à déplacement imposé (Fig. 11). Les contraintes et les déformations sont déterminées au centre de l'éprouvette (moyenne par élément sur une surface équivalente à la longueur de grille des jauges) pour la comparaison numérique/expérimentale avec les jauges de déformations.

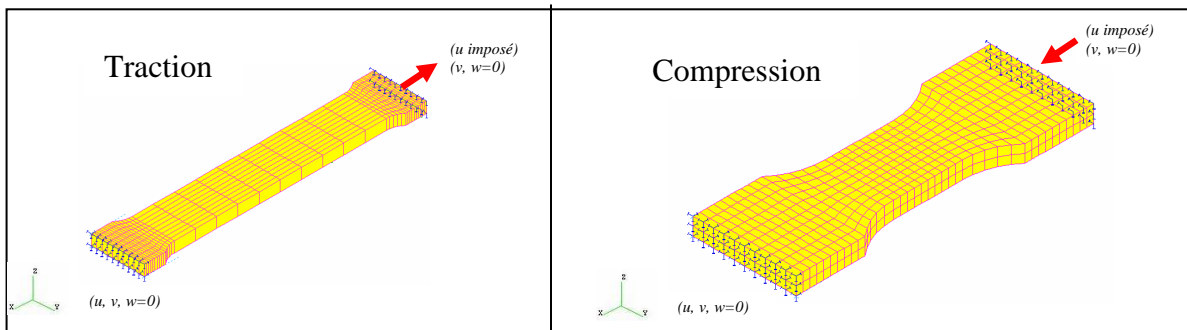


Fig. 11. Maillage de l'éprouvette de traction et de compression.

Les lois du comportement utilisées sont :

Le potentiel thermodynamique :  $\rho\phi = \frac{1}{2}[\langle \varepsilon_1 \rangle_+ E_1 (1-d_1) \langle \varepsilon_1 \rangle_+]$  eq. 3

La contrainte :  $\sigma_1 = \rho \frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon_1} = \{E_1 \cdot (1-d_1) \cdot \varepsilon_1$  eq. 4

La variable associée :  $Y_1 = \left\{ -\frac{\partial \phi}{\partial d_1^T} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1^2 \cdot E_1) \right.$  eq. 5

La fonction seuil d'endommagement :  $F_d(Y, D) = Y_{eq} - Y_1 - Y_0 \leq 0$  eq. 6

$\dot{d} = \lambda_d \frac{\partial F_d}{\partial Y}$ , Le multiplicateur  $\lambda_d$  est déterminé par la condition de cohérence  $\dot{F}_d = F_d = 0$

$Y_1 - Y_0$  est identifié par essai

La prise en compte des déformations résiduelles passe par l'ajout dans l'expression du potentiel thermodynamique du potentiel plastique :  $\rho\phi = \rho\phi_e(\varepsilon_e, d) + \rho\phi_p(p, d)$  eq. 7

Où p est la variable d'état correspondant à la plasticité à écrouissage isotrope

La variable R associée à la plasticité:  $R = \frac{\partial \phi}{\partial p} = \frac{\partial \phi_p}{\partial p}$  eq. 8

Le couplage plasticité-endommagement se fait par l'introduction de la contrainte effective dans le critère de plasticité :  $F_p(p, d) = \bar{\sigma}_{eq}(d) - R(p) - R_0 \leq 0$  eq. 9

Les lois complémentaires :  $\dot{\varepsilon}_p = \lambda_p \frac{\partial F_p}{\partial \sigma}$ ,  $\dot{p} = -\lambda_p \frac{\partial F_p}{\partial R}$  eq. 10

Le multiplicateur  $\lambda_p$  est déterminé par la condition de cohérence  $\dot{F}_p = F_p = 0$

L'évolution de  $R(p) - R_0$  a été déterminée expérimentalement sous forme

La contrainte équivalente est :  $\bar{\sigma}_{eq}(d) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{1-d_1}\right)^2} = \frac{\sigma_1}{1-d_1}$  eq. 11

Les seules lois qui changent entre la traction et compression sont les lois identifiées par des essais. La figure 12 montre une comparaison essai/calcul en traction et en compression.

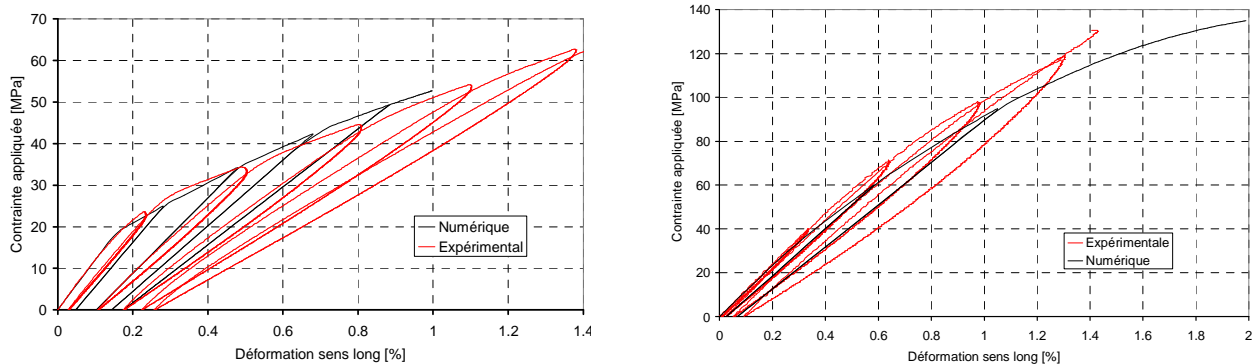


Fig. 12. Comparaison de comportement du matériau de SMC-R (essai/calcul) en traction et en compression

## 2.2 Modélisation du comportement en traction-compression couplées

Le maillage et les conditions aux limites sont identiques à la modélisation des essais de compression ; seul change le chargement qui introduit un cyclage en traction-compression.

La modélisation du comportement a été réalisée pour deux cas : le premier sans pseudo plasticité et le deuxième avec pseudo plasticité.

Les lois du comportement utilisées sont :

Le potentiel thermodynamique :  $\rho\phi = \frac{1}{2}[\langle \varepsilon_1 \rangle_+ E_1 (1-d_1^T) \langle \varepsilon_1 \rangle_+ + \langle \varepsilon_1 \rangle_- E_1 (1-d_1^C) \langle \varepsilon_1 \rangle_-]$  eq. 12

Avec  $d_1^T$  variable d'endommagement en traction sens longitudinal,  $d_1^C$ , variable d'endommagement en compression sens longitudinal.

La contrainte :  $\sigma_1 = \rho \frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon_1} = \begin{cases} E_1 \cdot (1 - d_1^C) \cdot \varepsilon_1^- & \text{si } \varepsilon_1 \leq 0 \\ E_1 \cdot (1 - d_1^T) \cdot \varepsilon_1^+ & \text{si } \varepsilon_1 > 0 \end{cases}$  eq. 13

Les variables associées :  $Y_1 = \begin{cases} -\frac{\partial \phi}{\partial d_1^T} = \frac{1}{2} \left( \langle \varepsilon_1^+ \rangle^2 \cdot E_1 \right) & \text{si } \varepsilon_1 > 0 \\ -\frac{\partial \phi}{\partial d_1^C} = \frac{1}{2} \left( \langle \varepsilon_1^- \rangle^2 \cdot E_1 \right) & \text{si } \varepsilon_1 \leq 0 \end{cases}$  eq. 14

La fonction seuil d'endommagement :  $F_d(Y, D) = Y_{eq} - Y - Y_0 \leq 0$  eq. 15

Le potentiel thermodynamique :  $\rho \phi = \rho \phi_e(\varepsilon_e, d) + \rho \phi_p(p, d)$  eq. 16

La variable R associée à la plasticité :  $R = \frac{\partial \phi}{\partial p} = \frac{\partial \phi_p}{\partial p}$  eq. 17

Le couplage plasticité-endommagement : on introduit alors deux critères de plasticité couplés à l'endommagement :  $F_p^i(p_i, d_i) = \bar{\sigma}_{eq} - R_i(p_i) - R_0^i \leq 0$  eq. 18

Avec  $i = (+, -)$  selon si l'on se place en traction ou en compression

Les lois complémentaires :  $\dot{\varepsilon}_p = \dot{\lambda}_p \frac{\partial F_p}{\partial \sigma}$  eq. 19  
 $\dot{p} = -\dot{\lambda}_p \frac{\partial F_p}{\partial R}$

La déformation plastique (inélastique) :  $\dot{\varepsilon}_p = \dot{\lambda}_p^+ \frac{\partial F_p^+}{\partial \sigma^+} + \dot{\lambda}_p^- \frac{\partial F_p^-}{\partial \sigma^-}$  eq. 20

Le critère de plasticité :  $F_p^i(p_i, d_i) = \frac{\sigma_i}{1 - d_i} - R_i(p_i) - R_0^i \leq 0$  eq. 21

La courbe expérimentale de l'essai montre que lors du passage en compression il y a une reprise de rigidité due à la fermeture des dommages de traction. Lors du passage de compression en traction le même effet apparaît, afin de modéliser cet effet on met en place la formulation suivante :

$$\sigma_1 = E_1 (1 - d_1^T * \eta^T) * (1 - d_1^C * \eta^C) (\varepsilon_1 - \varepsilon_1^p)$$
 eq. 22

Avec :

$\left\{ \begin{array}{l} 1 \Rightarrow \eta^C = 0; \eta^T = 1 \quad \text{si } \varepsilon_1 > 0 \\ 2 \Rightarrow \eta^C = \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^{pT}} \right)^2 \right]; \eta^T = \left( 1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^{pT}} \right)^2 \quad \text{si } (\varepsilon_1 \leq 0 \text{ et }  \varepsilon_1  < \varepsilon_1^{pT}) \\ 3 \Rightarrow \eta^C = \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^{pC}} \right)^2 \right]; \eta^T = \left( 1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^{pC}} \right)^2 \quad \text{si } (\varepsilon_1 \leq 0 \text{ et }  \varepsilon_1  \geq \varepsilon_1^{pC}) \\ 4 \Rightarrow \eta^C = 1; \eta^T = 0 \quad \text{si } (\varepsilon_1 \leq 0 \text{ et }  \varepsilon_1  > \varepsilon_1^{pC}) \end{array} \right.$	<p>1 : traction pure</p> <p>2 : passage de traction à compression</p> <p>3 : passage de compression à traction</p> <p>4 : compression pure</p>
--	--

L'évolution des endommagements en traction-compression est montrée figure 13 pour les deux cas.

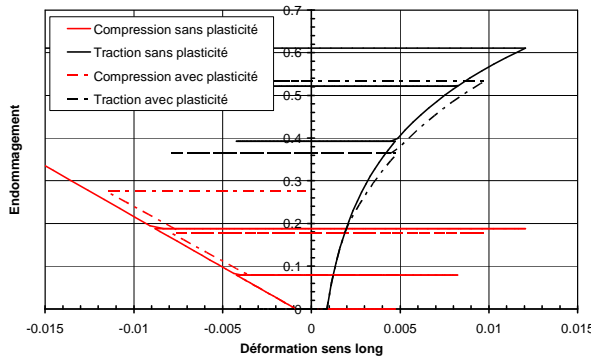
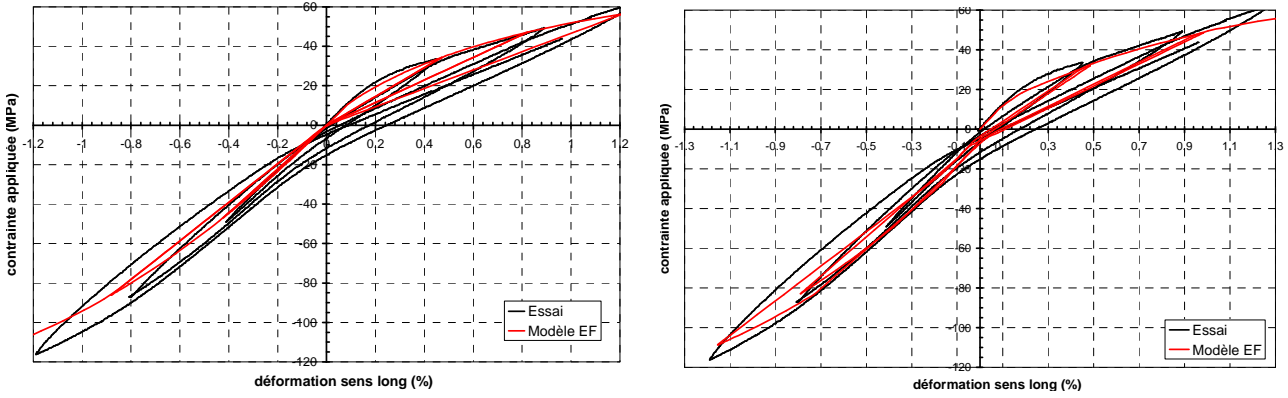


Fig. 13. Evolution des endommagements en traction et en compression en fonction de la déformation uniaxiale : comparaison avec et sans plasticité

La figure 14 montre la comparaison essai-modèle du comportement contrainte-déformation.



a. Sans des déformations résiduelles. b. avec plasticité et des fermetures de fissure  
 Fig. 14. Comportement en traction-compression. du SMC-R : Comparaison essai-modèle

Les résultats numériques avec prise en compte de la plasticité et l'effet des fermetures de fissure sont proches des résultats expérimentaux, même si les transitions entre traction-compression puis compression-traction sont plus marquées par la non prise en compte de l'hystérésis dans le comportement (effets visqueux, frottement interne).

### 2.3 Modélisation du comportement en traction-cisaillement couplés

Concernant le maillage et les conditions aux limites, l'éprouvette est modélisée par des éléments finis volumiques de degré 2 (3 d.d.l par nœuds). Les demi-disques sont modélisés en éléments de plaques (2 d.d.l par nœud) afin de minimiser le temps de calculs. Le modèle est paramétré de manière à modifier l'axe de sollicitation par l'introduction de l'angle entre l'axe de sollicitation de la machine d'essais et l'axe principal de l'éprouvette. La charge est introduite en un point, liée aux bords des demi-disques par des éléments rigides (Fig. 15).

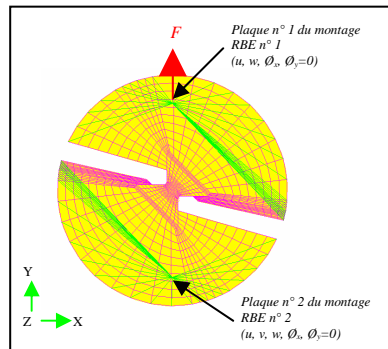


Fig. 15. Modélisation de l'essai ARCAN pour un essai de cisaillement et traction couplés.

Les lois du comportement utilisées sont :

Le potentiel thermodynamique :  $\rho\phi = \frac{1}{2} [\langle \varepsilon_1 \rangle_+ E_1 (1 - d_1^T) \langle \varepsilon_1 \rangle_+ + \langle \gamma_{12} \rangle G_{12} (1 - d_{12}) \langle \gamma_{12} \rangle]$  eq. 23

Avec  $d_1^T$  variable d'endommagement en traction sens longitudinal,  $d_{12}$ , variable d'endommagement en cisaillement.

La contrainte : 
$$\begin{cases} \sigma_1 = \rho \frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon_1} = E_1 \cdot (1 - d_1^T) \cdot \varepsilon_1^+ \\ \sigma_{12} = \rho \frac{\partial \phi}{\partial \gamma_{12}} = G_{12} \cdot (1 - d_{12}) \cdot \gamma_{12} \end{cases}$$
 eq. 24

Les variables associées : 
$$\begin{cases} Y_1 = -\frac{\partial \phi}{\partial d_1^T} = \frac{1}{2} (\langle \varepsilon_1^+ \rangle^2 \cdot E_1) \\ Y_{12} = -\frac{\partial \phi}{\partial d_{12}} = \frac{1}{2} (\langle \gamma_{12} \rangle^2 \cdot G_{12}) \end{cases}$$
 eq. 25

La fonction seuil d'endommagement :  $F_d(Y, D) = Y_{eq} - Y_T - Y_0 \leq 0$  eq. 26

est identifié par essai

Pour les essais de traction-cisaillement :  $Y_{eq} = \sqrt{Y_{12} + bY_1}$  eq. 27

b est le terme de couplage traction cisaillement plan.

Le critère de plasticité est identique aux études précédentes :

La contrainte équivalente dans le cadre du couplage traction-cisaillement

$$\bar{\sigma}_{eq} = \sqrt{\sigma_{12}^2 + a^2 \sigma_{11}^2} \quad \text{eq. 28}$$

L'évolution de  $R(p) - R_0$  et  $Y_T - Y_0$  ont été déterminé expérimentalement.

La figure 16 présente la comparaison essais/calculs du comportement en cisaillement et en traction.

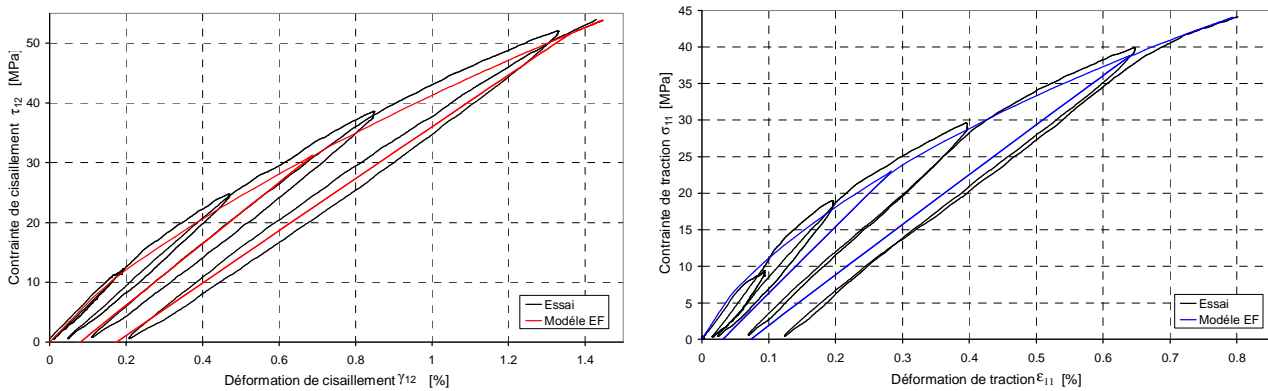


Fig. 16. Comparaison Essai/calcul du comportement en cisaillement et en traction.

## Conclusion

Les essais expérimentaux permettant d'identifier les lois d'endommagement et les lois de pseudo plasticité des composites à fibres courtes du type SMC-R. Il apparaît pour ces matériaux, que le comportement en traction et cisaillement est très différent du comportement en compression. Ce type de matériau s'endommage très vite sous une sollicitation de traction et/ou cisaillement, dû à une résistance faible de l'interface fibre-matrice. Par contre, sa tenue en compression est deux fois plus élevée que sa tenue en traction.

Ce qui est important est que lors de tous ces essais, on s'aperçoit que ce matériau possède des couches (strates) dans l'épaisseur dues au mode de fabrication. Dans l'étude numérique nous avons implémenté des lois de comportement élastoplastique endommageable de composites SMC-R.

Au final la loi de comportement développée comporte 2 aspects : un modèle micromécanique (Mori et Tanaka) qui, à partir des constituants du composite, permet de déterminer les constantes élastiques du matériau, et une loi élastoplastique endommageable qui prend en compte les comportements différents en traction, compression et cisaillement plan.

## Références

- [1] Z. Jendli, F. Meraghni, J. Fitoussi, D. Baptiste, «Micromechanical analysis of strain rate effect on damage evolution in sheet molding compound composites». Composites, Part A 35, pp. 779-785, 2004.
- [2] P. Ladevèze, E. Le Dantec, «Damage modeling of the elementary ply for laminated composites ». Composites Science and Technology, vol. 43, pp. 257-267, 1992.
- [3] A. Al-maghribi, F. Lachaud, J. J. Barrau, «analyse numérique et expérimentale en traction compression de structures composites à fibres courtes». CIFMA02 - IFCAM02, 2007.
- [4] M. Arcan, Z. Hashin, A. Voloshin, «A method to produce uniform plane-stress states with applications to fibre-reinforced materials». Experimental Mechanics, Vol 18 n°2, pp. 141-146, 1978.
- [5] A. Al-maghribi, «comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse». Thèse de l'université Paul Sabatier, Toulouse III, 2008.