

# Analyse et modélisation du comportement élasto-viscoplastique d'un adhésif dans un assemblage

## *Analysis and modeling of the elasto-visco-plastic behaviour of an adhesive in an assembly*

R. Créac'hcadec<sup>1</sup>, J.Y. Cognard<sup>1</sup> et L.Sohier<sup>2</sup>

Laboratoire Brestois de Mécanique et Systèmes  
EA 4325 - ENSIETA / Université de Brest / ENIB

1 : ENSIETA – Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs  
2 rue François VERNY – 29806 Brest CEDEX 9  
e-mail : Romain.Creac'hcadec@ensieta.fr, Jean-Yves.Cognard@ensieta.fr

2 : Université de Brest  
29285 Brest CEDEX  
e-mail : Laurent.Sohier@univ-brest.fr

### Résumé

Ce papier présente une contribution au développement d'un modèle 2D de comportement d'un adhésif dans un assemblage, partant d'une large base de données expérimentales dans le cas de chargements radiaux monotones. Les résultats expérimentaux ont été obtenus à l'aide d'un dispositif Arcan modifié avec des géométries spécifiques permettant de limiter de manière importante les effets de bords afin d'obtenir des informations fiables sur le comportement non linéaire de l'adhésif étudié (adhésif à base époxy HuntsmanTM, Basel, Switzerland, Araldite® 420 A/B). Ces résultats soulignent que les déformations de l'adhésif sont plus importantes en cisaillement qu'en pelage. Ainsi, un modèle non associé, avec une fonction seuil spécifique a été proposé afin de représenter précisément les observations expérimentales. Comme la distribution des contraintes dans le plan moyen du joint de colle est non uniforme dans l'adhésif pour l'essai Arcan utilisé, des techniques d'identifications inverses utilisant des simulations par éléments finis non linéaires ont été utilisées. D'abord, pour une vitesse de déformation donnée, un modèle élasto-plastique a été proposé. Puis, une extension du modèle à un comportement élasto-viscoplastique a été développée pour un rapport important des vitesses de déformations pour des essais de traction-cisaillement. Les comparaisons avec les données expérimentales sont présentées en utilisant des éléments joints (ou éléments d'interface) qui permettent de réduire de manière significative le coût numérique dans le cas de structures collées caractérisées par de faibles effets de bords.

### Abstract

This paper presents a contribution to the development of a 2D mechanical model for an adhesive in an assembly, starting from a large data base of experimental results in the case of radial monotonic loadings. The experimental results were obtained with a modified Arcan type fixture using specific geometries which strongly limit the influence of edge effects in order to obtain reliable information about the non-linear behavior of the adhesive (epoxy resin HuntsmanTM, Basel, Switzerland, Araldite® 420 A/B). These results underline that deformations in the adhesive are much larger for shear loadings than for peel loadings. Thus, a non-associated model, with a specific yield function was proposed to accurately represent the experimental observations. As the stress state is not uniform in the adhesive joint for the proposed Arcan type fixture, inverse identification techniques using non-linear finite element simulations were used. Firstly, for a given strain rate, an elasto-plastic model was proposed. Secondly, an extension to elasto-visco-plastic models was proposed for a wide range of deformation rates under tensile-shear loading tests. Comparisons with experimental data are presented using joint type elements (or interface elements) which allow to strongly limit the numerical cost in the case of bonded structures characterised with low edge effects.

**Mots Clés** : Adhésif ; Eléments d'Interface ; Modélisation ; Comportement Non linéaire  
**Keywords** : Adhesive ; Interface Elements ; Modeling ; Non-linear behavior

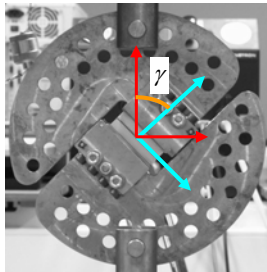
## 1. Introduction

Les bureaux d'études de l'industrie du nautisme de plaisance et de haute performance cherchent à remplacer les méthodes traditionnelles d'assemblage par le collage et à optimiser les assemblages collés existants. Cette méthode offre des avantages importants, notamment l'allégement, la réduction de problèmes de corrosion galvanique et le potentiel de réduction des coûts de fabrication. Afin d'utiliser au mieux ces avantages le collage doit être intégré dès le stade de la conception, ce qui nécessite dans les bureaux d'études la disponibilité d'outils qui soient adaptés aux spécificités de l'utilisateur et qui aient été validés par des essais sur des structures représentatives.

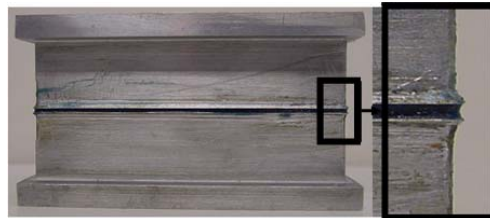
Cette communication présente le développement d'un outil numérique pour la modélisation du comportement d'un adhésif dans un assemblage à partir de résultats expérimentaux issus du montage Arcan modifié. L'utilisation d'éléments joints (ou éléments d'interface) permet de réduire de manière significative le coût numérique de simulation des assemblages collés pour des assemblages caractérisés par une très faible influence des effets de bords. Sous l'hypothèse d'un comportement élastique, une distribution non uniforme du profil des contraintes est observée au sein de l'adhésif pour l'essai Arcan utilisé. Ainsi une technique d'identification inverse couplant un code par éléments finis (CAST3M) à un logiciel d'optimisation (MATLAB) a été développée pour caractériser le comportement non linéaire du joint de colle dans un assemblage. L'étude réalisée pour des chargements monotones radiaux proportionnels à une vitesse de déformation donnée permet d'obtenir l'enveloppe élastique 2D dans le plan contrainte normale-contrainte tangentielle. De plus, pour les chargements monotones radiaux, un modèle du comportement viscoplastique de l'adhésif dans l'assemblage est proposé pour un important ratio de vitesses de déformation. L'analyse des déformations de l'adhésif pour des chargements de traction-cisaillement montre également des déplacements nettement plus importants en cisaillement qu'en pelage. Ainsi, un formalisme non associé est utilisé pour décrire le comportement de l'adhésif dans un assemblage. Des schémas d'intégration numérique ont été adaptés aux modèles de plasticité et de viscoplasticité proposés.

## 2. Sollicitation de traction-cisaillement sur un assemblage collé

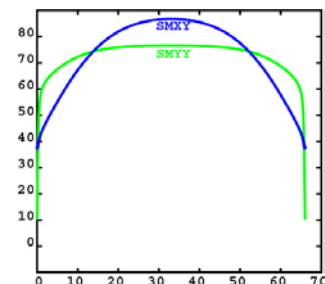
### 2.1 Dispositif expérimental Arcan limitant les effets de bords



(a) Essai de traction-cisaillement ( $\gamma = 45^\circ$ )



(b) Eprouvette Arcan et géométrie des becs



(c) Distribution des contraintes pour un essai de traction-cisaillement (plan moyen du joint de colle)

Fig. 1. Dispositif expérimental Arcan modifié.

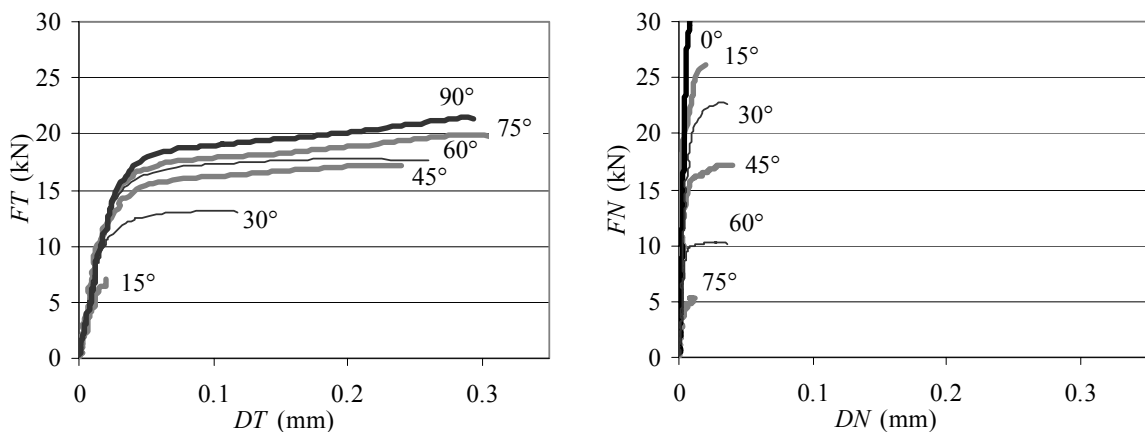
Afin d'étudier l'influence de la composante normale sur le comportement d'un adhésif dans un assemblage, un dispositif Arcan a été développé [1], qui permet de solliciter le joint de colle en compression, en traction, combiné avec des chargements de cisaillement (Figure 1). La direction de sollicitation par rapport au plan moyen du joint de colle est définie par l'angle  $\gamma \in [0^\circ; 135^\circ]$  (Figure 1a).  $0^\circ$  correspond à une sollicitation de traction,  $90^\circ$  à une sollicitation de cisaillement. Pour  $\gamma \in [0^\circ; 90^\circ]$ , respectivement  $\gamma \in [90^\circ; 135^\circ]$ , une sollicitation de traction-cisaillement, respectivement de compression-cisaillement, est imposée à l'adhésif. Les simulations numériques réalisées en élasticité linéaire, pour des structures bimatériaux, montrent que l'utilisation d'une géométrie spécifique du substrat (Figure 1b – un bec proche du joint de colle) permet de limiter de manière significative les singularités dues aux effets de bords. La Figure 1c met en évidence la distribution des contraintes pour un essai de traction-cisaillement sur une éprouvette Arcan. Les contraintes de cisaillement « SMXY » et de pelage « SMYY » sont maximales au centre et minimales aux extrémités du joint de colle. La distribution des contraintes est non homogène. Ce dispositif expérimental Arcan, associé avec un dispositif de mesure sans contact et une technique d'optimisation permet d'analyser pour des chargements proportionnels, le comportement d'un adhésif dans un assemblage. Les données expérimentales sont définies dans le plan effort-déplacement. *DN* et *DT*

représentent les déplacements relatifs des deux extrémités du joint de colle, respectivement, dans les directions normale et tangentielle du plan moyen du joint de colle. Ils sont déterminés au milieu de la longueur du joint de colle.  $FN$  et  $FT$  représentent, respectivement, les composantes de l'effort appliqué dans les directions normale et tangentielle du joint de colle.

## 2.2 Résultats expérimentaux pour l'adhésif base époxy Huntsman™ Araldite® 420 A/B [2]

### 2.2.1 Résultats pour des essais radiaux proportionnels à une vitesse ( $V=0.5$ mm/min)

La Figure 2 présente les courbes effort-déplacement dans les directions normale et tangentielle du comportement du joint de colle pour différents angles  $\gamma$  sous des chargements monotones à une vitesse de déplacement donnée de la traverse de la machine de traction ( $V = 0.5$  mm/min). Une différence significative est observée dans la direction tangentielle  $DT$  pour  $\gamma \geq 30^\circ$ . Il est important de noter que le comportement normal du déplacement relatif ( $DN$ ) de l'adhésif est nettement inférieur à celui du déplacement relatif tangentiel ( $DT$ ).

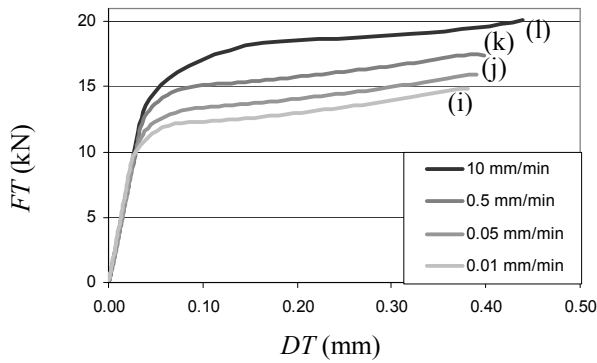


(a) Comportement dans la direction tangentielle (b) Comportement dans la direction normale  
Fig. 2. Résultats expérimentaux pour des essais de traction-cisaillement pour différents angles et des chargements radiaux monotones  $V = 0.5$  mm/min.

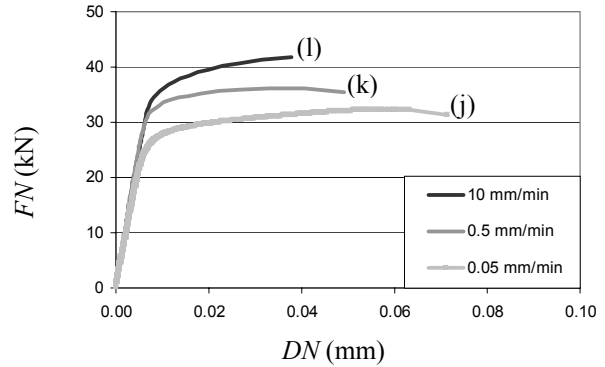
### 2.2.2 Résultats pour des essais radiaux proportionnels pour une large gamme de vitesse

Pour les adhésifs polymères, les effets de viscosité sont importants [3-5], et différents essais réalisés sur l'adhésif étudié ont montré de nombreux aspects de ce phénomène [1]. Différents essais ont également été réalisés pour des chargements monotones radiaux afin de caractériser le comportement non linéaire de l'adhésif sous chargements de traction-cisaillement pour une grande gamme de vitesses de déformation. La Figure 3 présente les résultats pour trois types d'essais : traction ( $\gamma=0^\circ$ ), traction-cisaillement ( $\gamma=45^\circ$ ) et cisaillement ( $\gamma=90^\circ$ ). De plus, quatre vitesses de déformations ont été utilisées pour caractériser le comportement de l'adhésif :  $V=0.01$  mm/min,  $V=0.05$  mm/min,  $V=0.5$  mm/min et  $V=10$  mm/min ; une grande gamme de vitesse est considérée pour analyser correctement les effets de viscosité [6]. Deux principaux phénomènes peuvent être soulignés. D'une part, un ratio important entre les déplacements relatifs dans les directions normale ( $DN$ ) et tangentielle ( $DT$ ) est observé : ce rapport peut atteindre un rapport de dix pour les essais de traction-cisaillement. D'autre part, une augmentation de la « limite d'élasticité apparente » est observée lors d'une augmentation de la vitesse de sollicitation. Ces phénomènes visqueux semblent être similaires pour les différents angles de chargement  $\gamma$ .

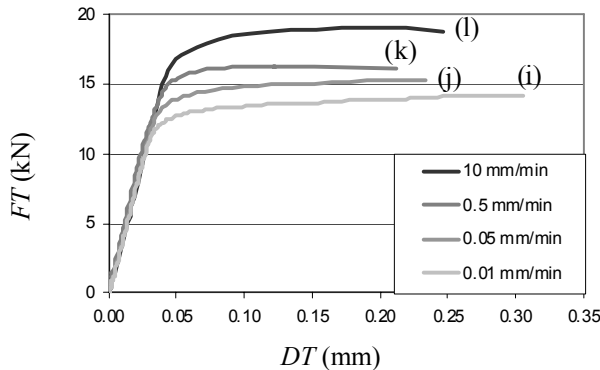
Ces résultats expérimentaux mettent en avant qu'un comportement élasto-viscoplastique peut-être considéré pour modéliser le comportement de l'adhésif Huntsman™ Araldite® 420 A/B.



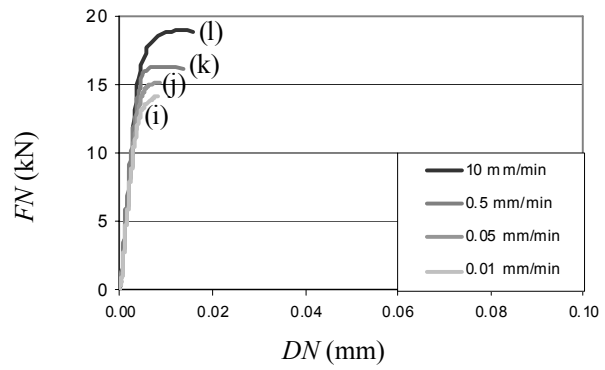
(a) Comportement dans la direction tangentielle pour des essais de cisaillement ( $\gamma = 90^\circ$ )



(b) Comportement dans la direction normale pour des essais de traction ( $\gamma = 0^\circ$ )



(c) Comportement dans la direction tangentielle pour des essais de traction-cisaillement ( $\gamma = 45^\circ$ )



(d) Comportement dans la direction normale pour des essais de traction-cisaillement ( $\gamma = 45^\circ$ )

Fig. 3. Résultats expérimentaux pour des essais de traction-cisaillement pour des chargements radiaux monotones pour quatre vitesses de chargement ( $V_i = 0.01$  mm/min,  $V_j = 0.05$  mm/min,  $V_k = 0.5$  mm/min et  $V_l = 10$  mm/min).

### 3. Modélisation

#### 3.1 Définition 2D d'un élément joint

Quand la dimension de l'un des constituants d'une structure hétérogène est faible au regard de celle des autres, il est possible de remplacer les éléments continus par des éléments d'interface ou éléments joints [7]. L'épaisseur de ces éléments est considérée égale à zéro. Ces éléments utilisent les mêmes variables nodales que les éléments continus et peuvent donc être facilement combinés. L'adhésif est modélisé par une surface  $\Gamma$  définie par la normale  $\vec{n}$  entre deux substrats  $S^+$  et  $S^-$  (Figure 3.2).



(a) Modèle d'interface

(b) Paramétrage de l'élément joint

Fig. 4. Élément joint et modèle d'interface 2D.

Cependant, alors que pour les éléments continus, les quantités caractéristiques au point d'intégration sont les composantes du tenseur des contraintes local, ces quantités sont, pour les éléments joints, les composantes du vecteur contrainte local  $\underline{T}$  interagissant à l'interface. Une loi constitutive pour ce type de formulation est une relation entre le vecteur contrainte  $\underline{T}$  et le saut en déplacement du joint  $[\underline{u}]$  (déplacement relatif entre les lignes  $\Gamma^+$  et  $\Gamma^-$ ). A l'aide des relations suivantes :

$$[\mathbf{u}] = \mathbf{u}(\Gamma^+) - \mathbf{u}(\Gamma^-) = u_n \cdot \bar{\mathbf{n}} + u_s \cdot \bar{\mathbf{s}} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\mathbf{T} = t_n \cdot \bar{\mathbf{n}} + t_s \cdot \bar{\mathbf{s}} \quad (\text{eq. 2})$$

Il est possible de définir les déplacements relatifs dans les directions normale et tangentielle  $(u_n, u_s)$  ainsi que les contraintes associées  $(t_n, t_s)$  normale et tangentielle du vecteur contrainte pour l'élément d'interface. Les variables  $u_n, u_s, t_n, t_s, \bar{\mathbf{n}}$  et  $\bar{\mathbf{s}}$  sont définies sur la Figure 4.

Ce type d'élément, qui utilise le déplacement relatif des deux extrémités de l'adhésif ainsi que le vecteur contrainte est capable de représenter le comportement mécanique des joints collés sans prendre en compte directement une formulation en grands déplacements. Il permet de réduire de manière importante le coût numérique des modèles. Ce type d'élément peut être justifié en présence d'une déformation homogène dans l'épaisseur.

En utilisant les notations précédentes, le comportement élastique peut s'écrire :

$$\mathbf{T} = \underline{\underline{\mathbf{K}_e}}[\mathbf{u}] \quad ; \quad \begin{bmatrix} t_n \\ t_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_n \\ u_s \end{bmatrix} = \underline{\underline{\mathbf{K}_e}}[\mathbf{u}] \quad (\text{eq. 3})$$

Où  $\underline{\underline{\mathbf{K}_e}}$  est la matrice d'élasticité,  $k_n$  est le module de traction et  $k_s$  est le module de cisaillement dont la dimension est  $[F/L^3]$  (F et L représentent respectivement une force et une longueur).

### 3.2 Méthode d'identification inverse

Afin d'identifier les paramètres de l'adhésif, un modèle éléments finis des éprouvettes Arcan a été proposé. La Figure 5 propose un aperçu du maillage utilisé ainsi que les conditions aux limites utilisées.

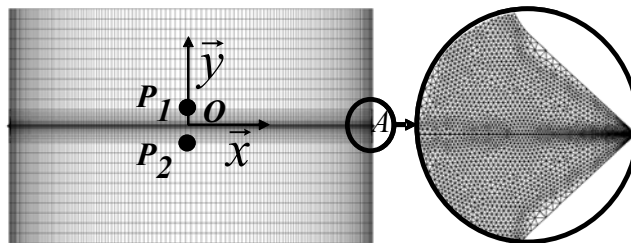


Fig. 5. Maillage du modèle par éléments finis pour l'optimisation.

Le pilotage en effort  $\bar{\mathbf{F}}_d$  se fait sur les parties inférieure et supérieure de l'éprouvette. Le problème peut être divisé par deux en considérant la moitié de l'éprouvette ainsi que des conditions d'antisymétrie le long de l'adhésif. Le champ de répartition de pression appliqué sur la partie supérieure de l'éprouvette est issu des données expérimentales en effort. Une condition de déplacement de solide rigide est également imposée aux lignes supérieure et inférieure afin de représenter la fixation des éprouvettes collées. Le champ des déplacements récupéré après le calcul correspond à la fenêtre d'analyse utilisée par la mesure de corrélation d'images, c'est-à-dire 2 mm au dessus et en dessous du joint de colle. Ce déplacement relatif (entre les deux points  $P_1$  et  $P_2$  de la Figure 5) est noté :  $\bar{\mathbf{D}} = DN \cdot \bar{\mathbf{x}} + DT \cdot \bar{\mathbf{y}}$ .

### 3.3 Formulation élasto-plastique non associée pour chargements radiaux ( $V=0.5$ mm/min)

#### 3.3.1 Formalisme non associé pour des modèles 2D

La combinaison d'une loi de comportement élasto-plastique à écrouissage isotrope utilisant une surface d'écoulement spécifique et d'une formulation par éléments joints nous permet de modéliser de manière précise le comportement du joint de colle pour des chargements radiaux (spécialement pour des chargements de traction et de cisaillement) [8]. Dans la partie suivante, afin de prendre en compte les différences importantes entre les déformations à rupture dans les directions tangentielle et normale, une formulation non associée est proposée.

### 3.3.2 Equations du modèle élasto-plastique

Dans le cadre de la thermodynamique des milieux continus, les relations constitutives utilisant des variables internes sont utilisées (en considérant que l'état du matériau est parfaitement défini à chaque pas par un jeu de variables appelées les variables d'état) [9, 10]. Dans ce contexte, pour le cas de matériaux standards, afin de formuler une relation constitutive, le choix de deux potentiels thermodynamiques doit être réalisé :

- un potentiel d'énergie libre  $\rho\psi$  qui donne les équations d'état,
- un potentiel de dissipation qui donne les lois d'évolution.

L'additivité des déplacements élastique  $[\underline{\mathbf{u}}]^e$  et plastique  $[\underline{\mathbf{u}}]^p$  (i. e., irréversible) est vérifié :

$$[\underline{\mathbf{u}}] = [\underline{\mathbf{u}}]^e + [\underline{\mathbf{u}}]^p \quad (\text{eq. 4})$$

En utilisant les notations classiques [9], l'énergie libre et les équations d'état sont telles que :

$$\rho\psi = \frac{1}{2} \text{trace}(\underline{\underline{\mathbf{K}}}_e [\underline{\mathbf{u}}]^e \cdot [\underline{\mathbf{u}}]^e) + h(p) \quad (\text{eq. 5})$$

$$[\underline{\mathbf{T}}] = \rho \frac{\partial \psi}{\partial [\underline{\mathbf{u}}]^e} = \underline{\underline{\mathbf{K}}}_e [\underline{\mathbf{u}}]^e \quad (\text{eq. 6})$$

$$R = \rho \frac{\partial \psi}{\partial p} = h'(p) = R_i + Ap \quad (\text{eq. 7})$$

Où  $h'(p)$  est une fonction caractéristique du matériau lié à l'écroutissement isotrope, qui peut être proposé sous une forme simple pour l'adhésif étudié.  $R_i$  et  $A$  sont des paramètres du matériau.  $\rho$  est la densité.

Nous introduisons également la surface seuil suivante et les lois d'évolution :

$$f_p = \|\underline{\underline{\mathbf{T}}}\| - R = \sqrt{\frac{\langle t_n \rangle_+^2}{a_+^2} + \frac{\langle t_n \rangle_-^2}{a_-^2} + \frac{t_s}{b^2}} - R \quad (\text{eq. 8})$$

Où  $f_p$  est la surface seuil,  $p$  est l'indice de plasticité cumulée ;  $\lambda_p$  est le multiplicateur plastique ;  $\langle x \rangle_+$  et  $\langle x \rangle_-$  sont respectivement la partie positive et la partie négative de  $x$  ;  $a_+$ ,  $a_-$  et  $b$  sont les paramètres caractéristiques du matériau. Un critère usuel pour les adhésifs a été utilisé [11].

Afin d'introduire un modèle non associé, nous définissons une seconde fonction elliptique pour décrire l'écoulement, définie par les paramètres  $c$  et  $d$  :

$$q = \sqrt{\frac{t_n^2}{c^2} + \frac{t_s^2}{d^2}} - R \quad (\text{eq. 9})$$

Les lois d'évolution sont alors telles que :

$$[\underline{\dot{\mathbf{u}}}]^p = \dot{\lambda} \frac{\partial q}{\partial \underline{\underline{\mathbf{T}}}} \quad (\text{eq. 10})$$

$$-\dot{p} = \dot{\lambda} \frac{\partial q}{\partial R} = -\dot{\lambda} \quad (\text{eq. 11})$$

$\lambda$  est le multiplicateur inélastique. Nous définissons ici une fonction d'écoulement (équation 9) sans dissymétrie en traction et en compression, telle que nous l'observons expérimentalement pour la fonction  $f$ . Les essais de traction-cisaillement ont principalement été analysés pour valider les possibilités d'un modèle de plasticité non associée. Afin de proposer un modèle précis pour décrire la différence entre le comportement en traction-cisaillement et en compression-cisaillement, il peut être nécessaire d'introduire également la propriété de dissymétrie dans la fonction d'écoulement de

manière identique à la définition de la fonction seuil élastique. De plus, la relation suivante est obtenue :

$$\lambda = \int_0^{\tau} \sqrt{\left([\dot{\underline{u}}]\right)^T \cdot \left([\dot{\underline{u}}]\right)^p} d\tau' = p \quad (\text{eq. 12})$$

L'intégration numérique a été réalisée en utilisant un algorithme du type « retour radial » [8, 12, 13] qui donne de bonnes performances pour les modèles plastiques.

### 3.3.3 Résultats de l'identification inverse

L'identification inverse a été réalisée en utilisant simultanément toutes les données expérimentales que le modèle doit représenter au mieux pour des chargements monotones radiaux de l'adhésif. Les résultats sont obtenus pour  $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 37.5^\circ, 45^\circ$  et  $90^\circ$  pour une vitesse de déplacement de 0.5 mm/min.

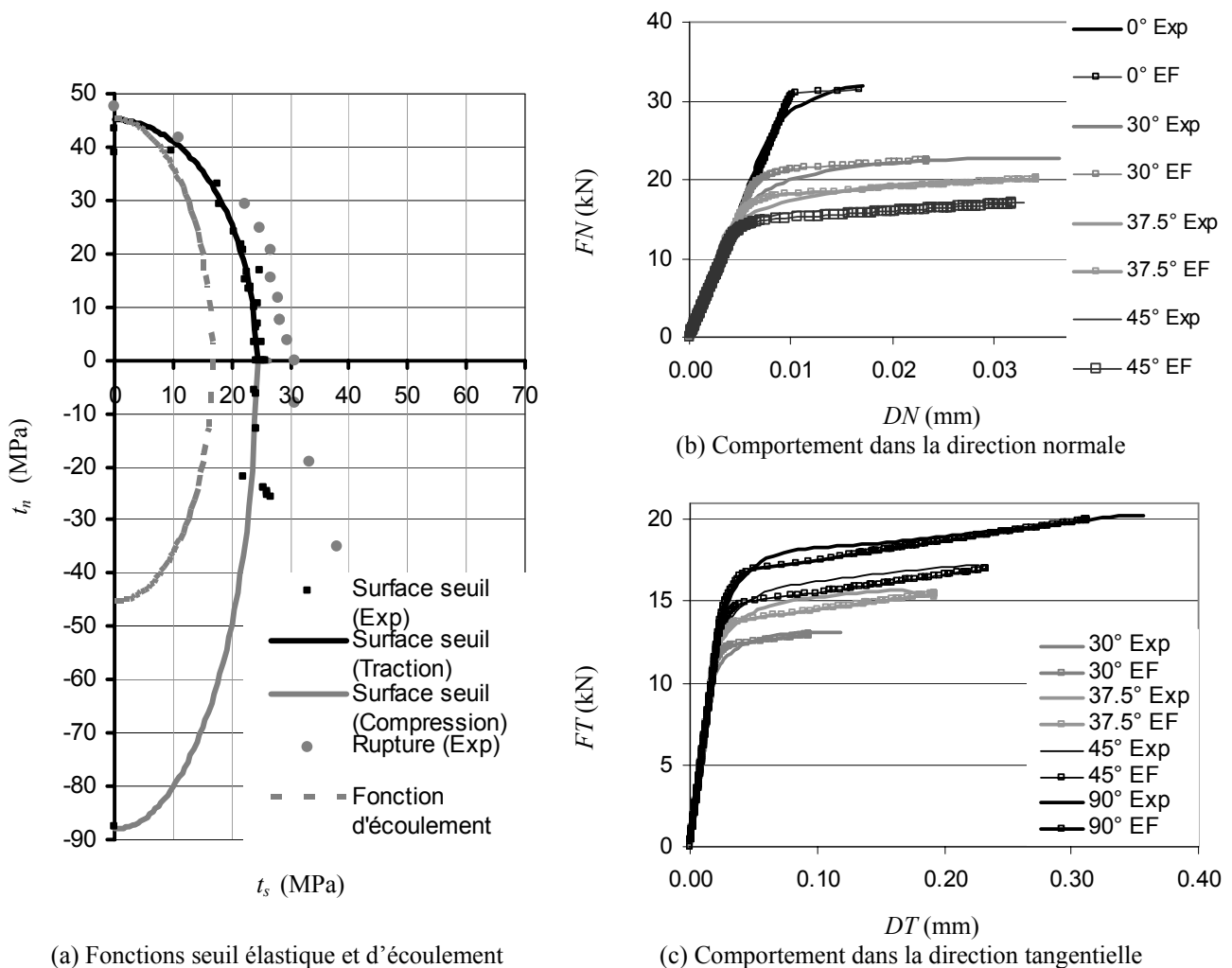


Fig. 6. Comparisons entre les résultats expérimentaux ("Exp") et les analyses par éléments finis ("EF") pour différents chargements radiaux ( $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 37.5^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ).

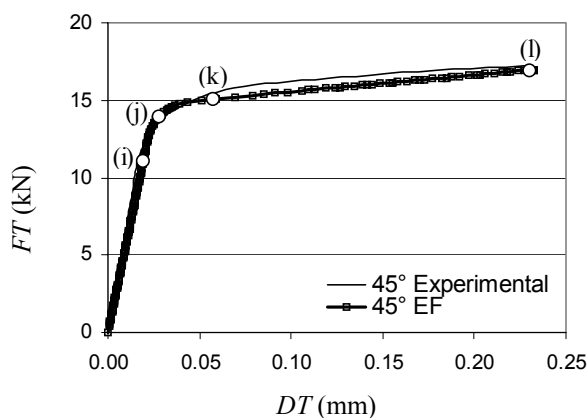
La Figure 6 présente pour différents chargements radiaux, les comparaisons entre les données expérimentales et les résultats obtenus pour des simulations par éléments finis utilisant les paramètres de l'adhésif obtenus par l'identification inverse. La Figure 6a montre la fonction seuil élastique ainsi que la fonction d'écoulement (à une échelle donnée) qui ont été déterminées (l'optimisation de la fonction d'écoulement doit être réalisée pour des chargements de compression-cisaillement). Les résultats expérimentaux (notés par "Exp") et les résultats par éléments finis notés ("EF") ont été tracés sur le même graphique effort-déplacement sur les Figures 6b et 6c. Les réponses pour le modèle proposé sont en bonne concordance avec les données expérimentales. Le choix simple proposé pour la loi d'écoulement nous permet de représenter de manière précise le rapport important du déplacement inélastique dans les directions normale et tangentielle. Le tableau 1 donne les valeurs des paramètres pour une formulation de plasticité non associée.

| Paramètres | $k_n$ (N/mm <sup>3</sup> ) | $k_s$ (N/mm <sup>3</sup> ) | $a_+$ | $a_-$ | $c$ | $R_i$ (MPa) | $A$ (N/mm <sup>3</sup> ) |
|------------|----------------------------|----------------------------|-------|-------|-----|-------------|--------------------------|
| Valeur     | 5575                       | 1015                       | 2.05  | 4     | 3.3 | 22          | 14                       |

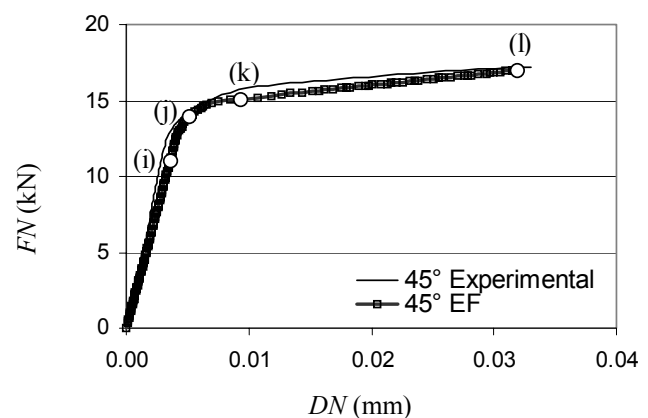
Tab. 1. Les valeurs obtenues.

### 3.3.4 Evolution de la répartition des contraintes dans le joint de colle

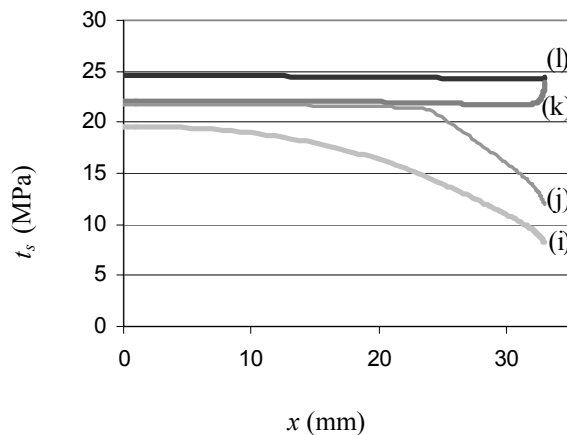
La Figure 7 détaille les résultats pour un essai de traction-cisaillement  $\gamma=45^\circ$ , essai quasiment le plus difficile à modéliser. Les Figures 7a et 7b présentent les courbes effort-déplacement expérimentale et numérique. Les Figures 7c et 7d représentent l'évolution des contraintes de cisaillement et de pelage le long de la moitié de l'adhésif (segment [OA], Figure 5) pour des étapes croissantes du niveau de chargement (les différents pas de calcul : i, j, k et l sont définis sur les Figures 7a et 7b). Après une répartition non uniforme des contraintes dans le domaine élastique (i), les contraintes deviennent presque uniformes pour des déplacements inélastiques important (avant la rupture) (l). Dans la partie transitoire, (j-k) une importante redistribution des contraintes est observée, associée à la plasticité dans l'adhésif. Des évolutions des contraintes similaires sont observées dans l'adhésif pour les différents chargements radiaux.



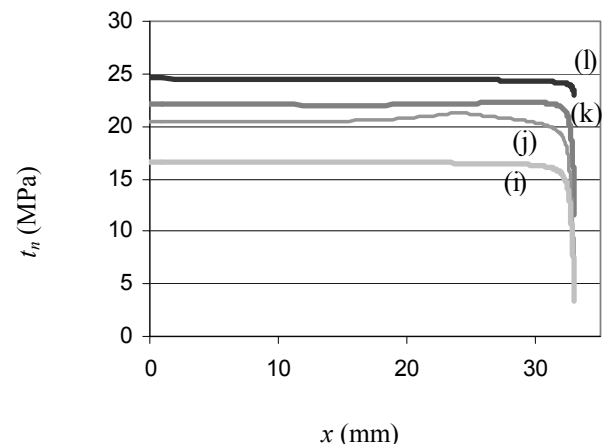
(a) Courbes effort-déplacement dans la direction tangentielle



(b) Courbes effort-déplacement dans la direction normale



(c) Evolution de la contrainte tangentielle dans l'adhésif pour différents pas de calculs (i, j, k, l)



(d) Evolution de la contrainte normale dans l'adhésif pour différents pas de calculs (i, j, k, l)

Fig. 7. Résultats pour un essai de traction-cisaillement ( $\gamma=45^\circ$ ).

## 3.4 Formulation élasto-viscoplastique non associée pour chargements radiaux

### 3.4.1 Equations du modèle élasto-viscoplastique

Par simplicité, nous conservons les mêmes notations que précédemment dans cette section. Nous écrivons les équations du modèle élasto-viscoplastique sous un formalisme non associé. Les équations d'état 5 et 6, la surface seuil 8 et la fonction d'écoulement 9 définies pour le modèle élasto-plastique sont

conservées [9]. Nous avons seulement défini les nouvelles lois d'évolution. Nous proposons de décrire les effets de vitesse en utilisant le potentiel de type Nouaïllas  $\Omega$  [8, 14] :

$$\Omega = \frac{K}{\alpha(n+1)} \exp\left(\alpha \left\langle \frac{q}{K} \right\rangle^{n+1}\right) \quad (\text{eq. 13})$$

où  $K$ ,  $\alpha$  et  $n$  sont les paramètres caractéristiques du matériau. On peut alors définir l'évolution des déplacements inélastiques :

$$[\dot{\mathbf{u}}]^p = \frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{T}} = \frac{\partial \Omega}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial \mathbf{T}} \quad (\text{eq. 14})$$

L'intégration numérique des équations constitutives de la loi de comportement élasto-viscoplastique, suit la démarche proposée par Corigliano [15].

### 3.4.2 Résultats de l'identification inverse

L'identification inverse a été réalisée en utilisant simultanément les résultats expérimentaux pour les trois chargements radiaux ( $\gamma = 0^\circ, 45^\circ$  et  $90^\circ$ ) et pour quatre vitesses de déplacement de la barre de traverse de la machine de traction ( $V = 0.01, 0.05, 0.5$  et  $10$  mm/min). Le tableau 2 donne les valeurs des paramètres du matériau pour la formulation élasto-viscoplastique non associée.

| Paramètres | $k_n$ (N/mm <sup>3</sup> ) | $k_s$ (N/mm <sup>3</sup> ) | $a_+$ | $a_-$ | $c$ | $R_i$ (MPa) | $A$ (N/mm <sup>3</sup> ) | $n$ | $K$  | $\alpha$ |
|------------|----------------------------|----------------------------|-------|-------|-----|-------------|--------------------------|-----|------|----------|
| Valeur     | 5575                       | 1015                       | 2.3   | 4     | 3.8 | 20          | 13                       | 1   | 2050 | 1        |

Tab. 2. Les valeurs obtenues.

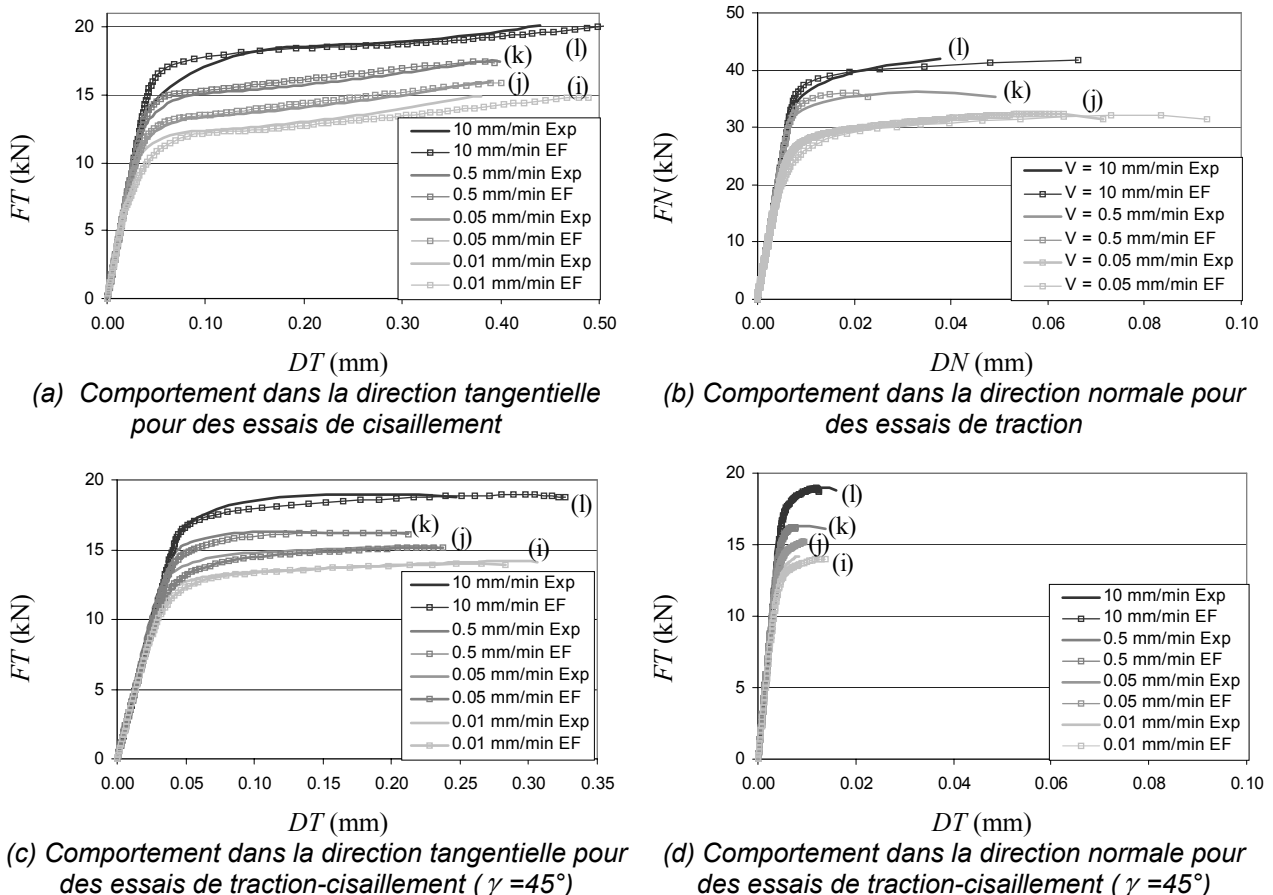


Fig. 8. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour différents essais radiaux à différentes vitesses de chargement ( $V_i = 0.01$  mm/min,  $V_j = 0.05$  mm/min,  $V_k = 0.5$  mm/min and  $V_l = 10$  mm/min).

La Figure 8 présente, pour différents chargements radiaux (cisaillement, traction-cisaillement et traction) et pour différentes vitesses de déplacement de traverse de la machine de traction, des

comparaisons entre les données expérimentales (notées "Exp") et celles obtenues par éléments finis (notées "EF") en utilisant les paramètres obtenus par l'identification inverse. Les réponses du modèle proposé sont en bonne correspondance avec les données expérimentales, prenant en compte le rapport important entre les déplacements inélastiques dans les directions normale et tangentielle pour un grand rapport des vitesses de chargement.

#### 4. Conclusion

Ce travail présente une contribution au développement d'un modèle de comportement 2D précis d'un adhésif dans un assemblage, partant d'une grande base d'essais expérimentaux dans le cas de chargements radiaux monotones. Les assemblages collés présentant peu d'effets de bords permettent l'utilisation d'éléments joints ; un modèle non associé 2D a été proposé pour représenter de manière précise les observations expérimentales sous sollicitations de traction-compression / cisaillement et en particulier, les déformations plus importantes en cisaillement qu'en pelage. Les réponses du modèle proposé, utilisant peu de paramètres sont en bonne concordance avec les données expérimentales dans le cas d'une grande plage de vitesse de déformations pour des essais de traction-cisaillement.

L'implémentation numérique du modèle proposé a été réalisée sous le formalisme des éléments joints (ou éléments d'interface), ce qui permet de réduire de manière significative le coût numérique dans le cas de structures collées caractérisées par de faibles effets de bords.

Ce travail doit être poursuivi afin d'analyser les conditions de stabilité pour ce type de modèle non associé [16] et d'étudier les techniques d'intégration numérique plus performantes pour réduire les coûts de calcul. De plus, le modèle doit être étendu afin de décrire de manière précise le comportement sous chargements cycliques et de relaxation. Il est également important de noter que le modèle proposé peut également être adapté à des formulations par éléments finis continus, en utilisant le formalisme des grandes déformations, afin d'analyser des structures industrielles en présence d'effets de bords.

#### Références

- [1] J. Y. Cognard, P. Davies, L. Sohier, R. Creach'cadec, «A study of the non-linear behavior of adhesively bonded composite assemblies», *Composite Structures*, Vol. 76, pp. 34-46, 2006.
- [2] Huntsman™ Structural Adhesives – Araldite® 420 A/B, Publication No A 161, UK 2004.
- [3] R.D. Adams, «Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications, Woodhead Publishing Ltd», England, 2005.
- [4] J.W.K. Chiu, P.D. Chalkley and R. Jones, «Effects of temperature on the shear-strain behaviour of structural adhesives (FM73)», *Computers & Structures*, Vol. 53, pp. 483-489, 1994.
- [5] M. Zgoul and A.D. Crocombe, «Numerical modelling of lapjoints bonded with a rate-dependent adhesive», *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 24, pp. 355-366, 2004.
- [6] Y. Rémond, «Constitutive modelling of viscoelastic unloading of short glass fibre-reinforced polyethylene», *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 421-428, 2005.
- [7] O. Allix, A. Corigliano, «Geometrical and interfacial non-linearities in the analysis of delamination in composites», *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 36, pp. 2189-2216, 1999.
- [8] R. Créac'hcadec, J. Y. Cognard, Th. Heuzé, «On modelling the behaviour of thin adhesive films in bonded assemblies with interface elements», *J. of Adhesion Sci. and Technol.*, Vol. 22, pp. 1541-1563, 2008.
- [9] J. Lemaitre et J. L. Chaboche, «Mechanics of Solid Materials», Cambridge University Press, (1994).
- [10] P. Ladevèze, «Non-linear Computational Structural Mechanics, New Approaches and Non-Incremental Methods of Calculation», Springer Verlag, 1999.
- [11] T. Keller and T. Vallée, «Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part II: joint strength prediction», *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36 pp. 341-350, 2005.
- [12] J. C. Simo and R. L. Taylor, «A return mapping algorithm for plane stress elastoplasticity», *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 22, pp. 649-670, 1986.
- [13] V. Magnier, E. Charkaluk, C. Bouby and G. De Saxcé, in: *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Structures Technology. Las Palmas de Gran Canaria (Spain)*, paper 68, 2006.
- [14] D. Nouaihlas, «Unified modelling of cyclic viscoplasticity: application to austenitic stainless steels», *International Journal of Plasticity*, Vol. 5, pp. 501-520, 1989.
- [15] A. Corigliano and M. Ricci, «Rate-dependent interface models: formulation and numerical applications», *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 547-576, 2001.
- [16] O. O. R. Famiyesin, «Energy adaptation of non-associated plasticity tangent matrices for symmetric solvers», *Computer and Structures*, Vol 79, pp. 1233-1250, 2001.