

---

# Caractérisation d'une interface collée

## Essai Arcan-Mines et mécanique linéaire de la rupture

Vladimir Gantchenko, Jacques Renard

Centre des matériaux PM Fourt, Mines-Paris Tech, CNRS UMR 7633, BP 87,  
91003 Evry cedex, France  
vladimir.gantchenko@mines-paristech.fr

---

**RÉSUMÉ.** *L'assemblage de nombreux matériaux, notamment l'assemblage de composites stratifiés, et l'assemblage de composites avec des métaux s'effectuent préférentiellement par collage. Le comportement mécanique d'un film de colle de faible épaisseur, de 100 à 500 microns, bridé par des surfaces adjacentes beaucoup plus raides, n'est pas celui du même matériau massif libre. Les propriétés de plasticité et de rupture de ces couches de colle, sous différents états de contraintes, doivent être déterminées de façon spécifique et sont intrinsèques. Les critères de plasticité et de rupture dépendent des invariants  $I_1$  (pression hydrostatique) et  $J_2$  (contrainte équivalente de Von Mises) du tenseur des contraintes. L'essai Arcan-Mines permet d'établir ces critères de plasticité et de rupture des films de colle soumis à des états de contraintes complexes. Ces critères sont des critères de Drucker-Prager modifiés. Le critère de rupture ainsi déterminé donne les mêmes résultats que la mécanique linéaire appliquée au film de colle lors d'une fissuration sous charge.*

**ABSTRACT.** *Assemblies of many materials, especially composites, laminates, interlayers, and assemblies of composites with metals are made preferentially with a structural adhesive. The mechanical behavior of an adhesive thin film, 100 to 500 micrometers of thickness, embedded by adjacent stiff surfaces, is not the behavior of the same free massive material. The plasticity and the rupture of those adhesive films subjected to complex state of stresses can be studied to get the intrinsic properties of the adhesives. Plasticity and rupture criteria depend on the stress invariants  $I_1$  (hydrostatic pressure) and  $J_2$  (Von Mises equivalent stress). The Arcan-Mines test gives those plasticity and rupture criteria of thin adhesive films when submitted to complex loading. Those criteria are modified Drucker-Prager criteria. The rupture criterion obtained with Arcan-Mines test is compared with results obtained with linear fracture mechanic applied to the fracture of the adhesive film.*

**MOTS-CLÉS :** *colle structurale époxyde, critères de plasticité et de rupture, facteur d'intensité de contrainte.*

**KEYWORDS:** *structural epoxy adhesive, plasticity and rupture criteria, stress intensity factor.*

---

DOI: 10.3166/rcma.2017.00019 © 2017 Lavoisier

## 1. Introduction

Les assemblages collés comportent des interfaces de colle de faible épaisseur, à savoir typiquement d'épaisseur 100 microns pour des assemblages très soignés et d'épaisseur 500 microns pour des assemblages industriels moins bien tolérancés.

Ces couches minces bridées par les éléments assemblés ont des propriétés de limite d'élasticité et de rupture qui dépendent des composantes du tenseur des contraintes qui leur est appliqué. Généralement, pour définir ce comportement, on fait intervenir la contrainte moyenne  $\bar{\sigma}$  (ou la trace  $I_1$  du tenseur des contraintes,  $I_1 = 3\bar{\sigma}$ ), et la contrainte équivalente de Von Mises  $J_2$  et l'on utilise un critère de Drucker-Prager modifié, du deuxième ordre.

Nous avons examiné dans le cas d'une couche de colle époxyde, d'épaisseur 500 microns, le passage du comportement élastique linéaire au comportement plastique et la tenue ultime pour différents états de contrainte.

En utilisant l'essai Arcan-Mines (Arcan et Weissberg, 1988 ; Bassery *et al.*, 2010), nous avons examiné les états de contrainte allant du cisaillement pur à la traction triaxiale.

Nous avons aussi regardé le comportement de cette colle en mécanique linéaire de la rupture lorsqu'elle se fissure et comparé ce comportement à celui déterminé par les essais Arcan-Mines.

## 2. Matériau testé

La colle utilisée est une colle époxyde bi-composant. Sa polymérisation a été accélérée par un traitement de deux heures à la température de 80 °C.

Cette même colle est utilisée dans le contexte d'assemblages structuraux d'éléments composites en aéronautique, dans une gamme de température allant de -60 °C à +80 °C.

Les essais présentés dans cet article ont été menés à la température ambiante de 25 °C.

Les essais effectués sont statiques.

## 3. Propriétés d'élasticité et d'anélasticité de la colle

Les propriétés d'élasticité, indispensables pour le dépouillement analytique ou numérique de l'essai Arcan-Mines dans le domaine de comportement linéaire, ont été mesurées à 25 °C en vibrations propres sur éprouvette prismatique (Gantchenko, 1996). Les essais sur éprouvettes haltères ont aussi été effectués, mais la colle polymérisée comporte de nombreuses porosités.

Le module de Young de flexion mesuré en vibrations propres est de  $E = 1\,545$  MPa, le frottement intérieur mesuré par la méthode de la bande passante autour du pic de flexion étant de  $\tan \varphi = 4,44 \cdot 10^{-2}$ . La colle est amortissante.

Le module de torsion obtenu en vibrations propres pour le barreau est de  $G = 532$  MPa.

Le comportement présente donc un frottement intérieur important et un coefficient de Poisson  $\nu = (E/2G) - 1 = 0,452$ , proche d'un comportement à volume constant.

Remarquons que l'utilisation de colles présentant un frottement interne important peut avoir des avantages au niveau du comportement dynamique des structures. Ces colles permettent d'amortir les amplitudes des vibrations propres des pièces en composite, pièces qui elles-mêmes amortissent très peu.

#### 4. Principe de l'essai Arcan-Mines

##### 4.1. Éprouvettes Arcan-Mines

Un film de colle, d'épaisseur constante calibrée de 500 microns, est réalisé entre deux embases en acier, grâce à un montage spécifique permettant d'obtenir une épaisseur ajustée et constante. Les films de 500 microns ne comportent pas de porosités.

L'ensemble, embase supérieure-couche de colle-embase inférieure, constitue l'éprouvette qui sera montée dans le montage Arcan-Mines afin de réaliser l'essai (figure 1).

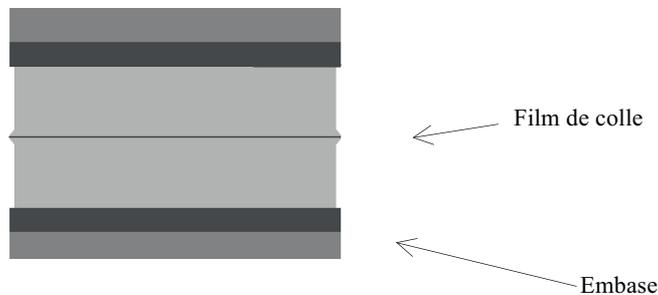


Figure 1. Embases reliées par un film de colle d'épaisseur constante, l'ensemble est monté dans le montage Arcan-Mines

##### 4.2. Montage Arcan-Mines

L'éprouvette est placée dans le montage. Le film de colle, situé entre les embases, est sollicité suivant différentes orientations de la force  $F$  appliquée au montage (figure 2).

Cette force  $F$  passe exactement par le centre de gravité du joint de colle. Elle peut se décomposer suivant deux composantes : une composante normale et une composante tangentielle au joint de colle. La composante normale peut être de traction ou de compression.

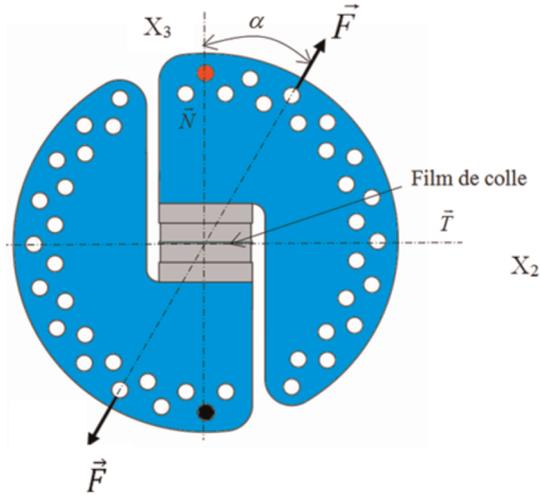


Figure 2. Montage Arcan-Mines. L'éprouvette est solidaire des deux haricots. Le film de colle peut être sollicité suivant différentes directions

### 5. État de contraintes dans le film de colle

Les composantes du tenseur des contraintes induites dans le film de colle sont :  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$ ,  $\sigma_{23}$  ( $\sigma_{23} = \sigma_{32} = t$ ) (figure 3).

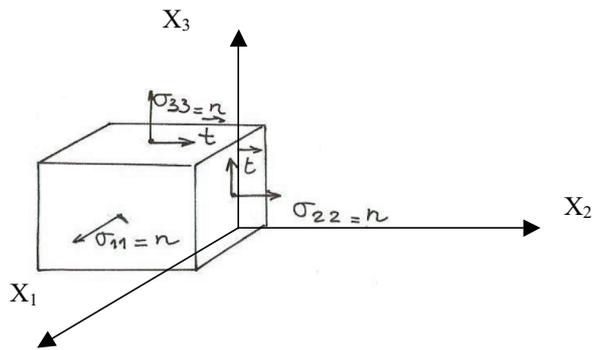


Figure 3. Composantes du tenseur des contraintes induites dans le film de colle, contraintes normales et contraintes de cisaillement

Dans le cas des conditions aux limites du montage et des matériaux utilisés, les déformations  $\varepsilon_{11}$  et  $\varepsilon_{22}$  du film sont bloquées par les embases métalliques pour une épaisseur de film faible et nous pouvons écrire dans le domaine de l'élasticité :

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{11} = 0 = \frac{\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})}{E} \quad (2)$$

où  $E$  est le module de Young et  $\nu$  le coefficient de Poisson.

$$\varepsilon_{22} = 0 = \frac{\sigma_{22} - \nu(\sigma_{33} + \sigma_{11})}{E} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{\sigma_{33} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})}{E} \quad (4)$$

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} \quad (5)$$

(2) avec  $\sigma_{11} = \sigma_{22} \Rightarrow \sigma_{33} = \frac{(1-\nu)}{\nu} \sigma_{11}$  et  $\sigma_{11} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{33}$

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \sigma_{33} \quad (6)$$

$$J_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{23})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$J_2 = \left[ \left( \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right)^2 (\sigma_{33})^2 + 3(\sigma_{23})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Le dépouillement des essais pour obtenir  $I_1$  et  $J_2$  nécessite la connaissance du coefficient  $\nu$  de Poisson. Nous avons mesuré, dans le domaine de l'élasticité, par une méthode de vibrations propres, le module de flexion  $E_f$  et le module de torsion  $G$  d'une éprouvette prismatique fabriquée avec la colle.

Nous avons trouvé :

- $E_f = 1\,545$  MPa ;
- $G = 532$  MPa et, pour un matériau isotrope,  $\nu = (E/2G) - 1 = 0,45207$ .

Nous avons aussi utilisé les relations (6) et (7) dans le domaine de plasticité, avec le même coefficient de Poisson que dans le domaine d'élasticité (cas de cette colle époxyde et de la majorité des colles où le coefficient de Poisson est le même dans les deux domaines).

## 6. Résultats obtenus avec le montage Arcan-Mines

### 6.1. Directions d'essai

Les essais ont été effectués pour quatre orientations  $\alpha$  de la force  $F$  vis-à-vis du film de colle :  $\alpha = 0, 30, 60$  et  $90^\circ$ . Le cas  $\alpha = 90^\circ$  correspond à du cisaillement pur et le cas correspond  $\alpha = 0^\circ$  à de la traction triaxiale dans le cas de l'épaisseur de 500 microns. L'essai à  $90^\circ$  permet d'obtenir aussi la loi de comportement généralisée de la colle.

Pour chacune des éprouvettes essayées, les invariants  $I_1$  et  $J_2$  du tenseur des contraintes (relations (6) et (7)) ont été calculés au centre de gravité de la couche de colle à :

- la limite du comportement élastique linéaire ;
- la charge maximale atteinte.

## 6.2. Courbe de traction généralisée

L'essai Arcan-Mines permet de tester en cisaillement pur une couche de colle mince lorsque le montage est orienté à  $90^\circ$ . La courbe expérimentale obtenue permet de relier la contrainte de cisaillement  $t$  et la déformation de cisaillement  $\gamma : t=f(\gamma)$ . Cette courbe est menée jusqu'à rupture.

On peut, à partir de cette loi de comportement en cisaillement, remonter à la courbe de traction généralisée en utilisant les notions de contrainte et de déformation équivalentes. Rappelons que l'essai à  $0^\circ$  n'est pas un essai de traction uni-axiale et ne fournit pas cette courbe.

Rappelons en notations matricielles les notions suivantes.

### 6.2.1. Contrainte équivalente (contrainte de Von Mises et contrainte de traction équivalente)

$$J_2 = \bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2)}$$

$$\sigma_4 = \sigma_{23} = t$$

En cisaillement pur :

$$J_2 = \bar{\sigma} = \sqrt{3}\sigma_4 \quad (8)$$

La contrainte de traction équivalente  $\bar{\sigma}$  s'obtient en multipliant la contrainte de cisaillement  $t$  par  $\sqrt{3}$ .

### 6.2.2. Déformation équivalente (déformation de Von Mises)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + 6(\varepsilon_4^2 + \varepsilon_5^2 + \varepsilon_6^2)}$$

En cisaillement pur :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{6\varepsilon_4^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_4 = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

où  $\gamma$  est la déformation de cisaillement définie par Coulomb.

La déformation de traction équivalente  $\bar{\varepsilon}$  s'obtient en divisant la déformation de cisaillement  $\gamma$  de Coulomb par  $\sqrt{3}$ .

### 6.2.3. Loi de comportement généralisée

La figure 4 présente la loi de comportement généralisée :  $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon})$ , obtenue à partir des essais Arcan-Mines à  $90^\circ$  pour la colle. Le module moyen de traction ainsi obtenu est de 1 465 MPa. En vibration de flexion, nous avons obtenu un module de 1 545 MPa sur un autre échantillon de la même colle.

Cette loi de comportement généralisée peut être utilisée dans les calculs numériques pour décrire le comportement non linéaire de la colle aux grandes déformations.

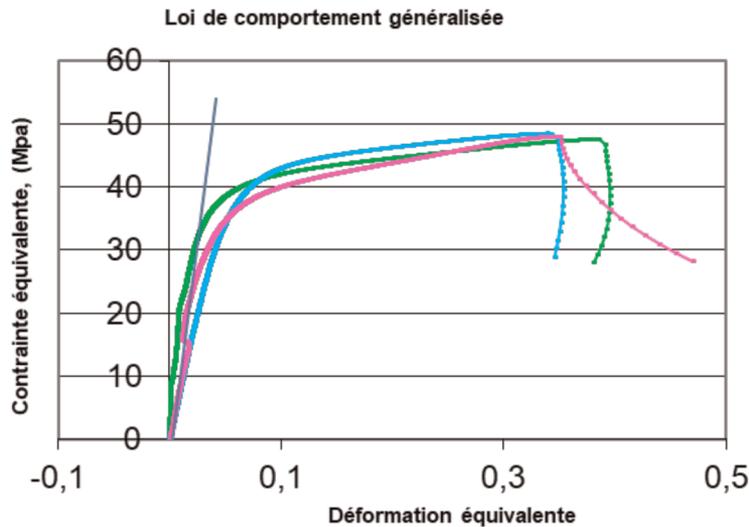


Figure 4. Loi de comportement généralisée obtenue à partir des essais Arcan-Mines à  $90^\circ$

### 6.3. Critères d'élasticité et de rupture obtenus avec une épaisseur de colle de 500 microns

Les résultats expérimentaux sont représentés dans le plan  $I_1 - J_2$ , où  $I_1$  est la trace du tenseur des contraintes et  $J_2$  la contrainte équivalente de Von Mises (figure 5). Les courbes ajustées sont des paraboles.

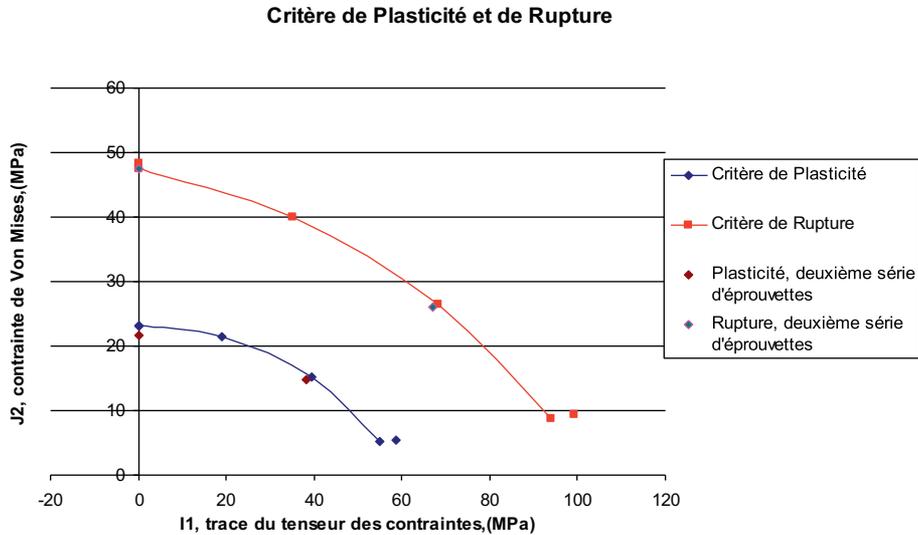


Figure 5. Critères de plasticité et de rupture de la colle

Remarquons la faible dispersion des essais mécaniques d'une série d'éprouvettes à une autre et le très bon ajustement des points expérimentaux par une parabole.

Nous avons ajusté un critère modifié du type Prager-Drucker, du deuxième ordre :

$$J_2^2 - \beta R_0^2 + I_1(\beta - 1)R_0 = 0 \quad (10)$$

Nous avons ajusté des paraboles sur les points expérimentaux, à la limite d'élasticité (critère de plasticité) et à la rupture (critère de rupture).  $\beta$  et  $R_0$  en plasticité et à la rupture sont des caractéristiques de la colle.  $\beta$  exprime la sensibilité de la colle à la contrainte hydrostatique et  $R_0$  la résistance de la colle au cisaillement.

Nous avons aussi calculé à partir de l'essai Arcan-Mines, dans le domaine du comportement élastique, le module de cisaillement et le module d'Young en utilisant la valeur du coefficient de Poisson de  $\nu=0,45207$ , valeur déterminée par vibrations propres.

Nous avons trouvé :

- $G = 592$  MPa ;
- $E = 1\ 620$  MPa.

Ces valeurs sont proches des valeurs obtenues par vibrations propres :

- $G = 532$  MPa ;
- $E = 1\ 545$  MPa sur une autre éprouvette.

Ces valeurs montrent la précision du montage d'essais Arcan-Mines.

**6.4. Résultats obtenus avec des épaisseurs supérieures à 500 microns, comparaison avec les résultats de l'essai de traction uni-axiale**

Des épaisseurs de colle de 930, 1 620 et 2 600 microns ont été réalisées avec des embases pour le dispositif Arcan-Mines (les épaisseurs de 1 620 et 2 600 microns comportent des bulles ou porosités).

Les raideurs trouvées avec l'essai Arcan-Mines, pour la direction d'essai  $\alpha = 0^\circ$ , sur toutes ces épaisseurs ne sont plus celles d'un film mince. Elles se rapprochent progressivement de celles des éprouvettes de traction uni-axiale. Nous avons placé dans le plan  $I_1 - J_2$  des critères de plasticité et de rupture, les résultats des essais de traction uni-axiale obtenus sur éprouvette haltère, et considéré aussi nos épaisseurs de 930, 1 620 et 2 600 microns, testées pour  $\alpha = 0^\circ$ , comme des essais de traction uni-axiale (figure 6).

Lorsque l'épaisseur du film de colle sollicité en traction atteint le mm, le comportement de la colle devient macroscopique au sens de celui du matériau massif libre. Notons que plus le film est mince, plus il est performant.

Par ailleurs :

– le comportement des essais Arcan-Mines, pour la direction d'essai  $\alpha = 90^\circ$ , avec des épaisseurs de 1,02, 1,67 et 2,74 mm, n'est plus aussi celui des films de 500 microns d'épaisseur : la raideur initiale n'est plus une raideur de cisaillement et, de plus, la

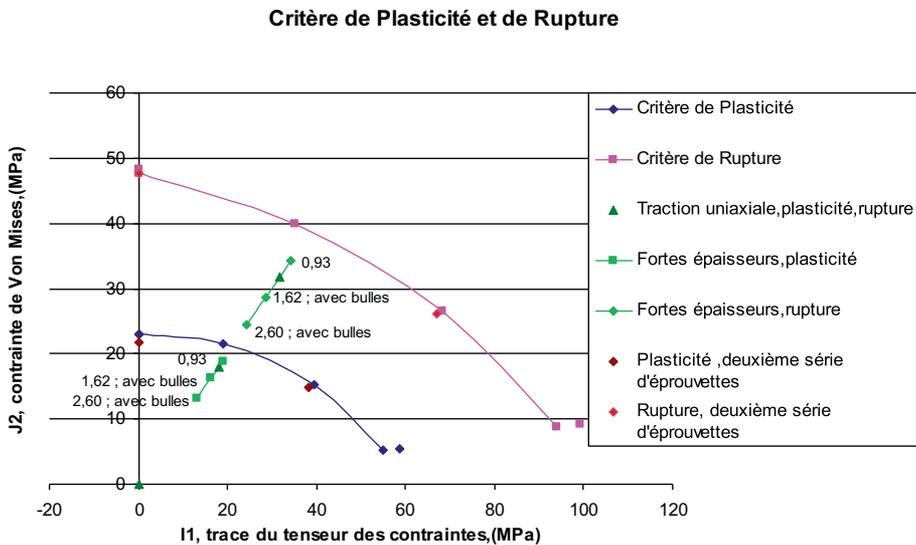


Figure 6. Résultats des essais, pour de fortes épaisseurs pour la direction  $\alpha = 0^\circ$ . Ces résultats se rapprochent des résultats obtenus avec des éprouvettes haltères en traction uni-axiale (points triangles)

rupture démarre à  $45^\circ$  du plan d'adhésion, ce qui montre le changement du mode de comportement du film épais qui passe du cisaillement à la flexion. Les forces trouvées sont plus faibles que celles du film d'épaisseur 500 microns ;

– le comportement des essais Arcan-Mines, pour les directions d'essai  $\alpha = 30^\circ$  et  $60^\circ$  d'épaisseur 0,97 mm, n'est plus aussi celui des films de 500 microns d'épaisseur. Les forces trouvées sont plus faibles que dans le cas du film d'épaisseur 500 microns.

## 7. Essais de mécanique linéaire de la rupture

### 7.1. Éprouvettes de flexion

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes de flexion à entaille latérale (éprouvette normalisée SENB [Single End Notch Bending]) (figure 7). Elles remplissent les conditions d'état de contrainte en déformation plane.

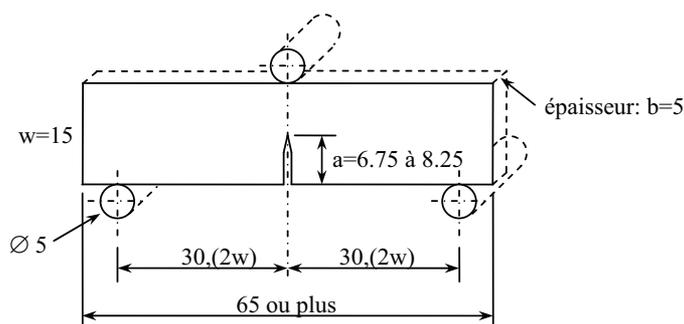


Figure 7. Dimensions des éprouvettes, de flexion entaillée SENB, utilisées.  
L'entaille a été réalisée au cutter

### 7.2. Facteur d'intensité de contrainte et énergie de propagation de la fissure

Les courbes obtenues en flexion trois points présentent moins de 10 % de non-linéarité et satisfont aux principes de la mécanique linéaire-élastique de la rupture (figure 8) (norme ISO 13586) (Krawczak, 2011).

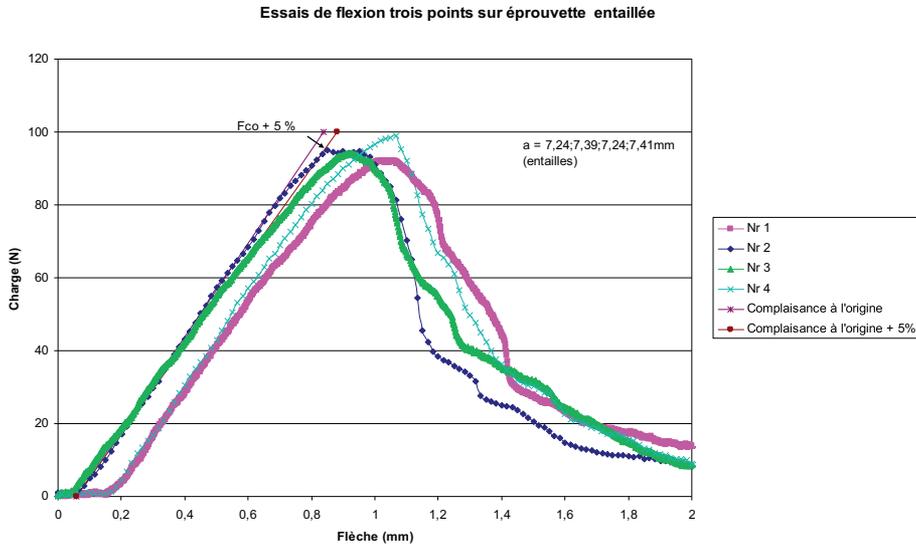


Figure 8. Essais de flexion trois points sur éprouvette entaillée

La force critique  $F_c$  mesurée permet de calculer en mode I le facteur d'intensité de contrainte  $K_{IC}$  (Miannay, 1995, p. 40) et le taux de restitution d'énergie (ou énergie de propagation de la fissure),  $G_{IC}$ , qui sont liés, en élasticité linéaire.

$$K_{IC} = \frac{6F_c}{bw^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{a}{w}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{[1,99 - [(\frac{a}{w})(1 - (\frac{a}{w}))(2,15 - 3,93(\frac{a}{w}) + 2,7(\frac{a}{w})^2)]]}{(2(1 + 2(a/w))(1 - (a/w))^{\frac{8}{3}})} \quad (11)$$

### 7.3. Facteur d'intensité de contrainte $K_{IC}$

Les valeurs obtenues pour le facteur d'intensité de contrainte  $K_{IC}$  sont les suivantes :

Vitesse de flexion (mm/mm)	Force critique : $F_{co} + 5\%$ (N)	Ténacité $K_{IC}$ (Mpa $\sqrt{m}$ )
1	91,5	0,754
1	93,5	0,770
10	95	0,809
10	94,5	0,805

Ces valeurs sont celles d'une résine époxyde (Brethous, 2013). Le comportement de la résine dépend de la vitesse de déformation car elle est amortissante.

Dans les assemblages réalisés par collage et présentant des défauts, par exemple des porosités, on peut faire une approche utilisant la mécanique linéaire de la rupture pour étudier leur endommagement.

#### 7.4. Énergie de propagation de la fissure

L'énergie de propagation de la fissure en élasticité linéaire est liée au facteur d'intensité de contrainte :

$$G_{IC} = \frac{1 - \nu^2}{E} K_{IC}^2 \quad (12)$$

Pour  $\nu = 0,452$ ,  $E = 1\,545$  MPa et  $K_{IC} = 0,785$  MPa  $\sqrt{m}$  (valeur moyenne sur les quatre essais), nous trouvons :

$$G_{IC} = 3,174 \cdot 10^{-4} \text{ Mpa.m}^{-1} (317,4 \text{ J.m}^{-2})$$

Cette valeur est à utiliser dans les approches énergétiques.

On peut aussi utiliser directement, comme nous allons le montrer dans la section 8, les critères de rupture, établis expérimentalement sur les couches de colle, en utilisant l'essai Arcan-Mines.

### 8. Comparaison des essais de la mécanique linéaire de la rupture avec les résultats de l'essai Arcan-Mines

Nous avons considéré les essais Arcan-Mines, lors de la rupture, comme des essais de propagation de fissure :

- comme une rupture en mode I pour les essais effectués à  $\alpha = 0^\circ$  ;
- comme une rupture en mode III pour les essais effectués à  $\alpha = 90^\circ$ .

Nous avons calculé analytiquement le champ de contrainte à une distance critique  $r = 0,10$  mm du front de fissure (figure 9) et à  $\theta = 0^\circ$  dans le plan de la fissure. Nous

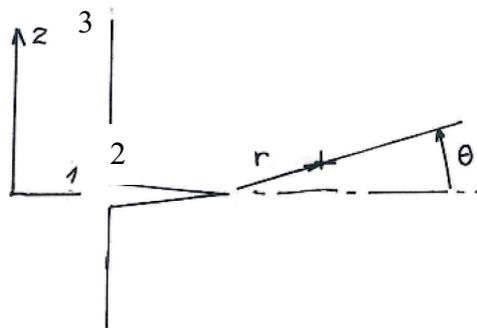


Figure 9. Coordonnées considérées pour l'état de contrainte de la fissure

avons utilisé les caractéristiques d'élasticité de notre colle et les facteurs d'intensité de contrainte mesurés :

$$K_{IC} = 0,785 \text{ Mpa } \sqrt{\text{m}}$$

Pour avoir une approximation en mode III de  $K_{IIIc}$ , nous avons supposé que les contraintes de cohésion étaient en  $E/10$  en traction et en  $G/10$  en cisaillement (Gilman, 1962). Pour le mode III en cisaillement, nous obtenons alors :

$$K_{IIIc} = K_{IC} \sqrt{\frac{G}{E}} = 0,406 \text{ Mpa } \sqrt{\text{m}}$$

On pourrait arriver à la même approximation en considérant les potentiels élastiques qui sont respectivement proportionnels à  $E$  et  $G$ .

En mode I, dans le plan de la fissure, avec  $\theta = 0^\circ$  (Miannay, 1995, p. 16) :

$$\sigma_3 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (13)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (14)$$

$$\sigma_1 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (15)$$

En mode III, dans le plan de la fissure :

$$\sigma_{32} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (16)$$

En modes I et III, les valeurs trouvées pour les invariants  $I_1$  et  $J_2$  (avec les formules (6) et (7)) ont été reportées dans le plan  $I_1 - J_2$  des résultats obtenus avec les essais Arcan-Mines de la colle (figure 10).

Les points calculés en mécanique linéaire de la rupture, en début de fissuration, en mode I et en mode III, sont en bon accord avec les résultats des essais correspondants Arcan-Mines.

## 9. Conclusion

Dans le cas d'assemblage de matériaux rigides par collage :

– les critères de plasticité et de rupture, obtenus avec l'essai Arcan-Mines, peuvent être utilisés pour les collages de faible épaisseur, 100 à 500 microns.

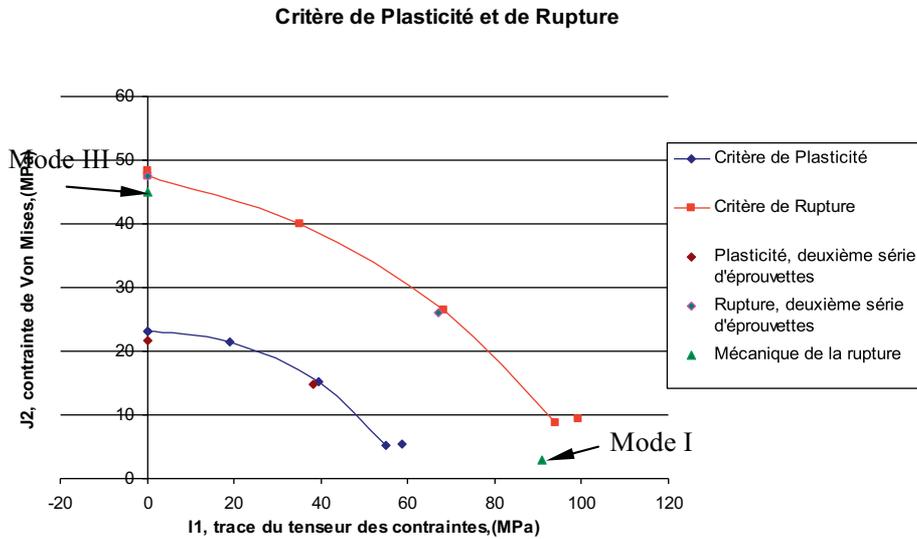


Figure 10. Calcul de la fissuration de la colle en modes I et III, comparaison avec les essais Arcan-Mines

Ces critères permettent de prévoir leur endommagement et leur rupture en sollicitation statique.

Le comportement d'un film mince, bridé par les surfaces adjacentes, n'est pas celui du matériau massif. Les critères de Drucker-Prager du deuxième ordre permettent de décrire les frontières du domaine de comportement linéaire et de l'endommagement par rupture, lors d'états de contrainte complexes. Ces critères du deuxième ordre prennent en compte la contrainte hydrostatique et la contrainte équivalente de Von Mises ;

- les facteurs d'intensité de contrainte obtenus en mécanique linéaire de la rupture permettent d'aborder le problème de la rupture par fissuration d'un film mince de colle (en mode I ou en mode III), d'une autre façon que le critère de rupture obtenu avec l'essai Arcan-Mines.

Ils donnent des résultats très proches de celui-ci pour ces modes. Le critère de rupture déterminé avec l'essai Arcan-Mines est très proche d'un critère de fissuration établi pour le film mince de colle.

## Bibliographie

- Arcan M., Weissberg V. (1988). *A uniform pure shear testing specimen for adhesive characterization*. Rapport technique STP 981. American Society for Testing and Materials.
- Bassery J., Gantchenko V., Renard J. (2010). Caractérisation multiaxiale des interfaces multi-matériaux : application aux assemblages collés. *Revue des composites et des matériaux avancés*, p. 135-152.

- Brethous R. (2013). *Assemblages collés modèles à base d'adhésifs nano-structurés : inter-diffusion entre des copolymères tri-blocs et une résine époxyde*, thèse. Université de Toulouse.
- Gilman J.J. (1962). Strength of ceramics crystals. *Am. Ceram. Soc. Conf.*, New York.
- Gantchenko V. (1996). *Polycopié de cours : TP essais mécaniques. Détermination pour un matériau, par une méthode de vibrations propres, des modules d'élasticité*. ISMCM-CESTI.
- Krawczak P. (2011). Essais mécaniques des plastiques – Caractéristiques à long terme et ténacité. *Techniques de l'ingénieur*.
- Miannay D.P. (1995). *Mécanique de la rupture*. Les Éditions de physique.

