

CHAPITRE 12

Mécanismes de Rupture et Endommagement des Matériaux Composites

12.1 MÉCANISMES DE RUPTURE DANS LES MATÉRIAUX COMPOSITES

12.1.1 Introduction

Par mécanisme de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une “discontinuité” locale de matière appelée *fissure*. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de microfissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut. On parlera de *microfissuration*. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique (plusieurs fois celle des constituants), à partir des microfissures existantes. On parlera également de *macrofissuration*. Dans le cas des matériaux composites, l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique.

12.1.2 Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- la rupture des fibres,
- la rupture transverse de la matrice,
- la rupture longitudinale de la matrice,
- la rupture de l'interface fibre-matrice.

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées.

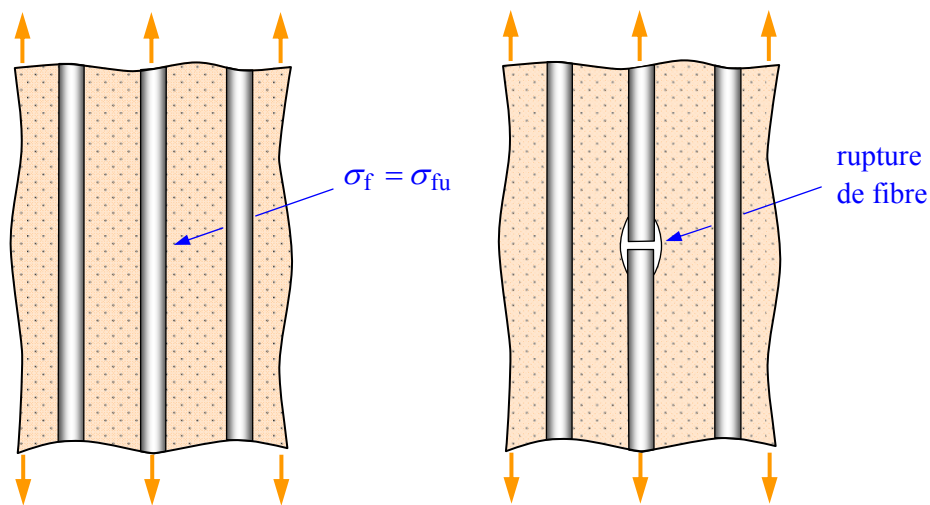


FIGURE 12.1. Rupture de fibre.

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction σ_f dans une fibre atteint la contrainte à la rupture σ_{fu} de la fibre (figure 12.1). La rupture de la fibre produit une concentration de contraintes au voisinage de la rupture. La redistribution de ces contraintes, et par conséquent le processus de rupture résultant, dépend principalement : de la contrainte à la rupture des fibres, de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée, des propriétés de l'interface fibre-matrice, etc. Les figures 12.2 montrent les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre.

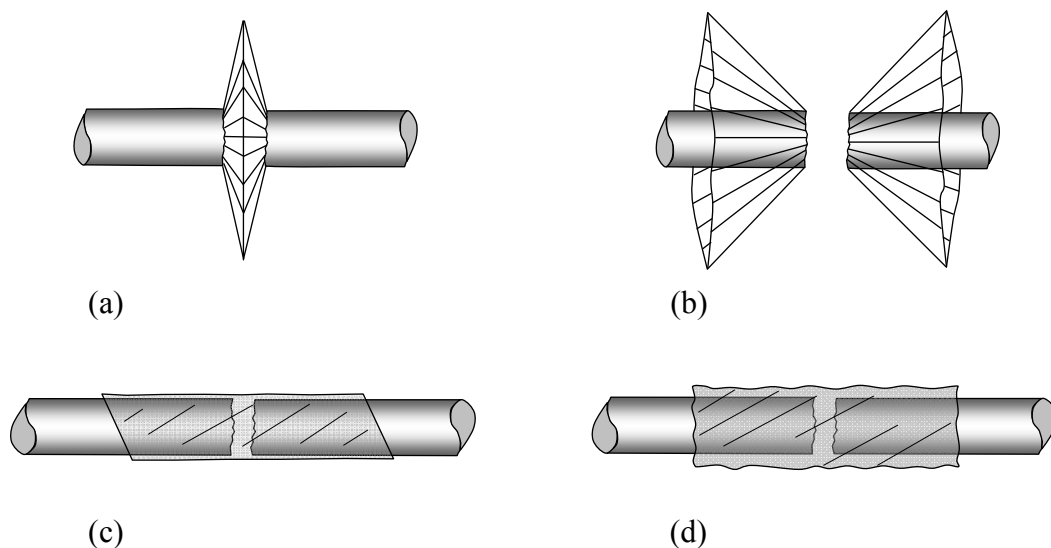


FIGURE 12.2. Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre. (a) Rupture transverse de la matrice ; (b) Rupture en cisaillement de la matrice ; (c) Décohésion de l'interface fibre-matrice ; (d) Rupture longitudinale de la matrice.

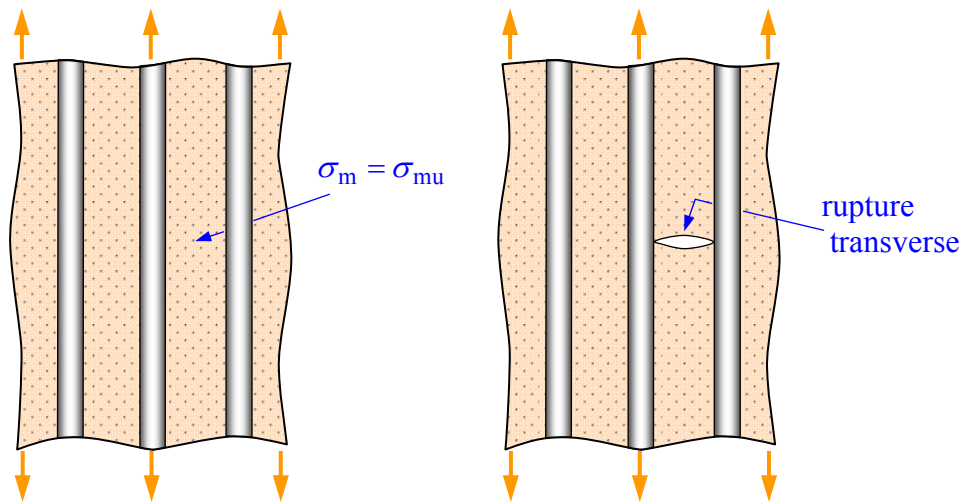


FIGURE 12.3. Rupture transverse de la matrice.

La fissuration de la matrice peut se produire, soit par *fissuration transverse* (figure 12.3) lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice, soit par *fissuration longitudinale* (figure 12.4) lorsque la contrainte de cisaillement τ_m dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture τ_{mu} , généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier mode de rupture, appelé “splitting” par les anglo-saxons, se produit lorsque la contrainte de décohesion est supérieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice : $\tau_d > \tau_{mu}$. Dans le cas contraire où $\tau_d < \tau_{mu}$, il se produit une *rupture par décohesion* de l'interface fibre-matrice (figure 12.5).

La rupture finale d'un matériau composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de ces divers mécanismes élémentaires. L'initiation, puis la propagation de la rupture dépendent des propriétés des fibres et de la matrice, de

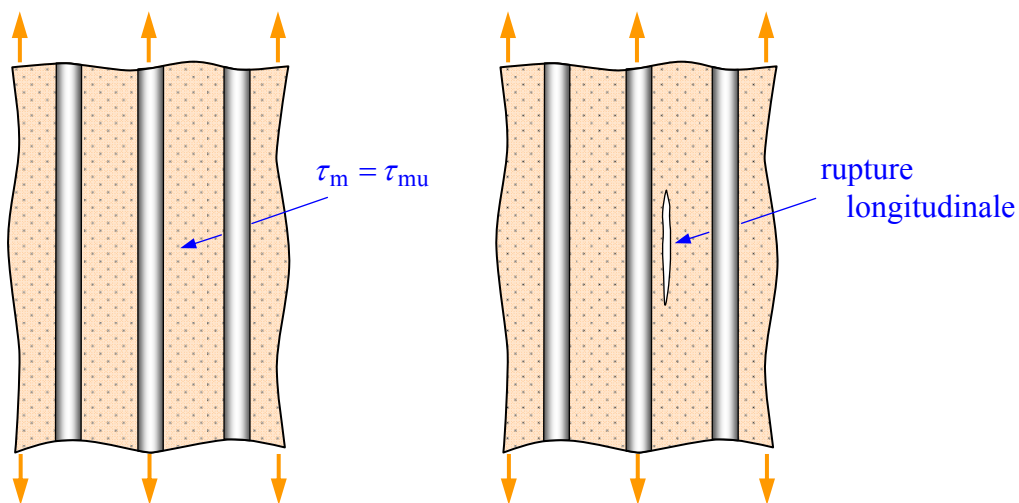


FIGURE 12.4. Rupture longitudinale de la matrice.

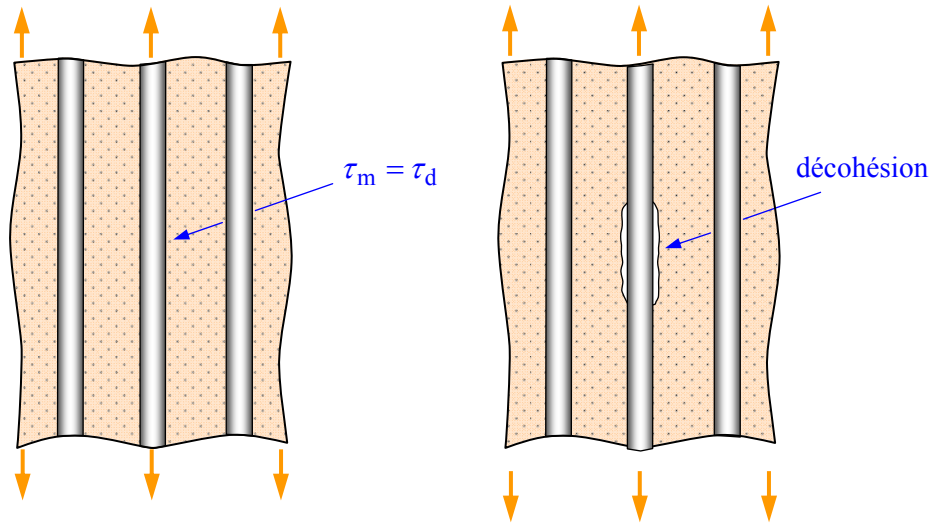


FIGURE 12.5. Décohésion fibre-matrice.

l'interface fibre-matrice, de la fraction volumique des fibres, de l'état et des conditions de sollicitations mécaniques imposées.

12.1.3 Composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par rupture des fibres lorsque la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ($\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$), soit par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire.

Dans le cas où $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$, les courbes contrainte-déformation sont schématisées sur la figure 12.6. En admettant l'égalité des déformations dans la fibre et dans la matrice, la relation (9.80) s'écrit au moment de la rupture :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}} (1 - V_f), \quad (12.1)$$

où σ_{cu} est la contrainte à la rupture du composite, σ_{fu} la contrainte à la rupture des fibres et $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}}$ la contrainte dans la matrice pour une déformation égale à la déformation ε_{fu} à la rupture des fibres. La contrainte $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}}$ est inférieure à la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice, d'où :

$$\sigma_{cu} \leq \sigma_{fu} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f). \quad (12.2)$$

Généralement, l'expression retenue pour la contrainte à la rupture du composite est la loi des mélanges :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f), \quad (12.3)$$

avec pour les fractions usuelles de fibres :

$$\sigma_{cu} \approx \sigma_{fu} V_f. \quad (12.4)$$

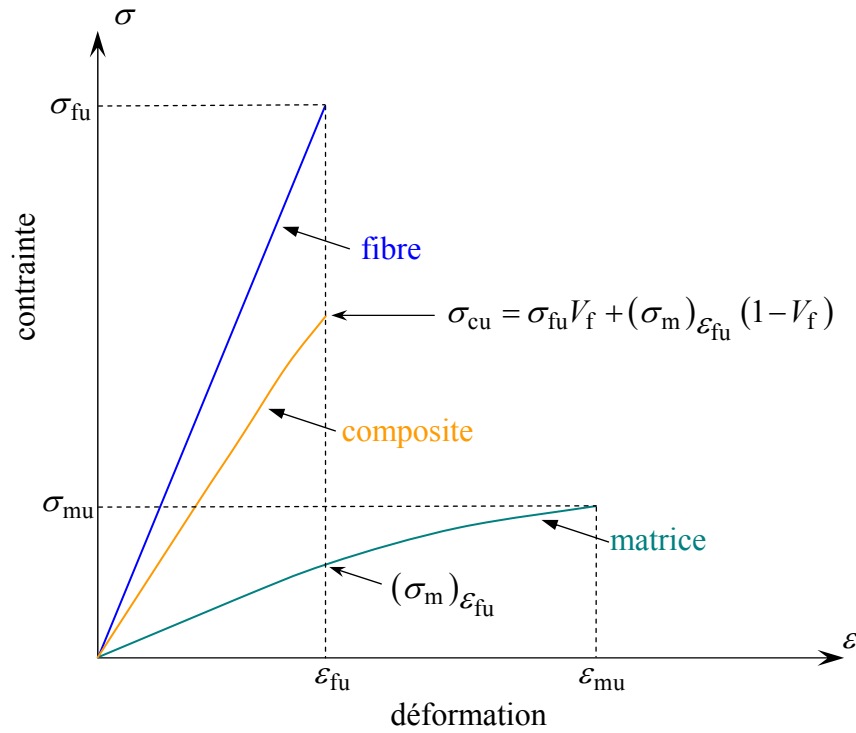


FIGURE 12.6. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$.

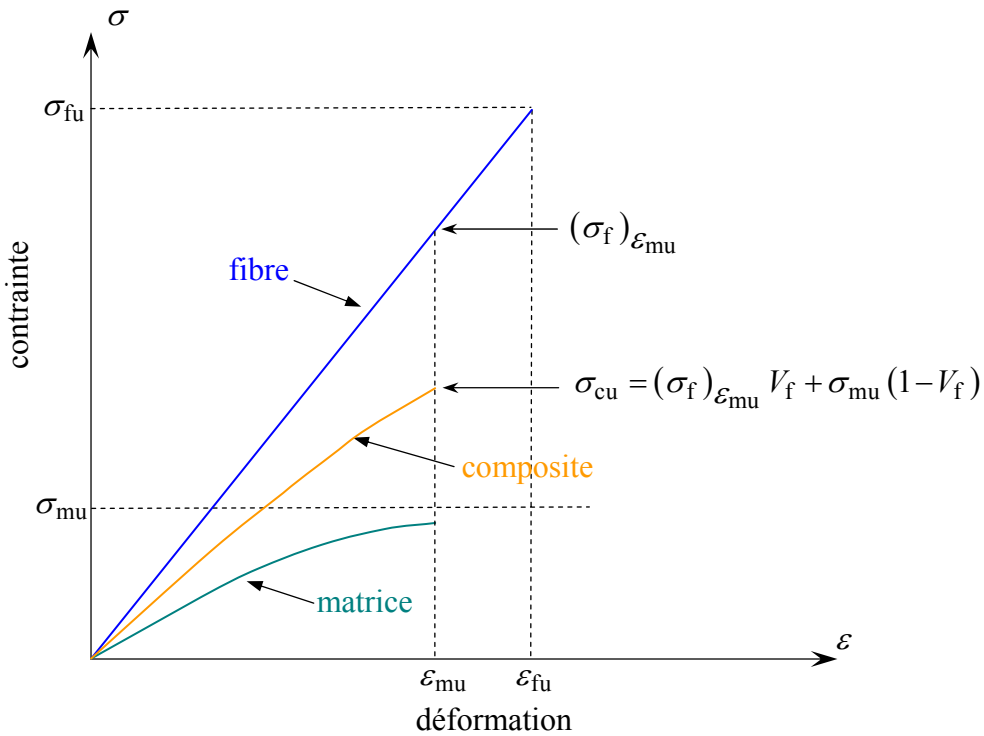


FIGURE 12.7. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$.

Dans le cas où la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle des fibres (figure 12.7), la contrainte à la rupture est donnée par l'expression :

$$\sigma_{cu} = (\sigma_f)_{\varepsilon_{mu}} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f), \quad (12.5)$$

où $(\sigma_f)_{\varepsilon_{mu}}$ est la contrainte dans la fibre au moment de la rupture de la matrice. La valeur de la contrainte à la rupture du matériau composite est alors bien inférieure à celle donnée par l'expression (12.1). La matrice ne permet pas dans ce cas de bénéficier totalement du renfort des fibres.

Les caractéristiques mécaniques (chapitre 2) des fibres usuelles sont :

— pour les fibres de carbone :

• à haute résistance (HS) :

$E_f = 220 \text{ GPa}$, $\sigma_{fu} = 3\,000 \text{ à } 4\,000 \text{ MPa}$, soit $\varepsilon_{fu} = 1,4 \text{ à } 1,8 \%$;

• à haut module (HM) :

$E_f = 400 \text{ GPa}$, $\sigma_{fu} \approx 2\,200 \text{ MPa}$, soit $\varepsilon_{fu} = 0,5 \%$;

— pour les fibres de verre E :

$E_f = 70 \text{ GPa}$, $\sigma_{fu} = 2\,400 \text{ à } 3\,400 \text{ MPa}$, soit $\varepsilon_{fu} = 3,4 \text{ à } 4,8 \%$.

L'allongement à la rupture des résines usuelles est :

— pour les polyesters rigides : $\varepsilon_{mu} = 2 \text{ à } 5 \%$,

— pour les résines phénoliques : $\varepsilon_{mu} \approx 2,5 \%$,

— pour les résines époxydes : $\varepsilon_{mu} = 2 \text{ à } 5 \%$.

En outre, en utilisation industrielle, les résines sont assez fortement chargées, conduisant à une diminution notable de la déformation à la rupture de la matrice. Ces chiffres montrent donc que les performances à la rupture des composites à hautes performances (composites à fibres de carbone) sont gouvernées par les propriétés à la rupture des fibres. Par contre, dans le cas de composites industriels à fibres de verre, les performances à la rupture peuvent être limitées par une déformabilité trop faible de la matrice. Il apparaît donc nécessaire d'adapter au mieux les propriétés de la matrice à celles des fibres pour optimiser les performances à la rupture des matériaux composites.

Après initiation, la propagation de la rupture diffère suivant la nature de l'interface fibre-matrice. Dans le cas d'une adhérence fibre-matrice élevée, la rupture initiée, soit par rupture des fibres, soit par rupture de la matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice (figure 12.8.1). La rupture observée est de type fragile (figure 12.8.2). Il est également possible d'observer un pontage, par rupture longitudinale de la matrice ou par décohésion fibre-matrice, de deux fissures initiées dans des zones différentes (figures 12.8.3 et 12.8.4).

Dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice, la propagation transverse de la fissuration peut être schématisée de la manière suivante. En tête de fissure, la rupture de la matrice traverse les fibres (figure 12.9), sans qu'il y ait rupture des fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice. Dans certains cas, les concentrations de contraintes en tête de fissure peuvent conduire (figure 12.9) à

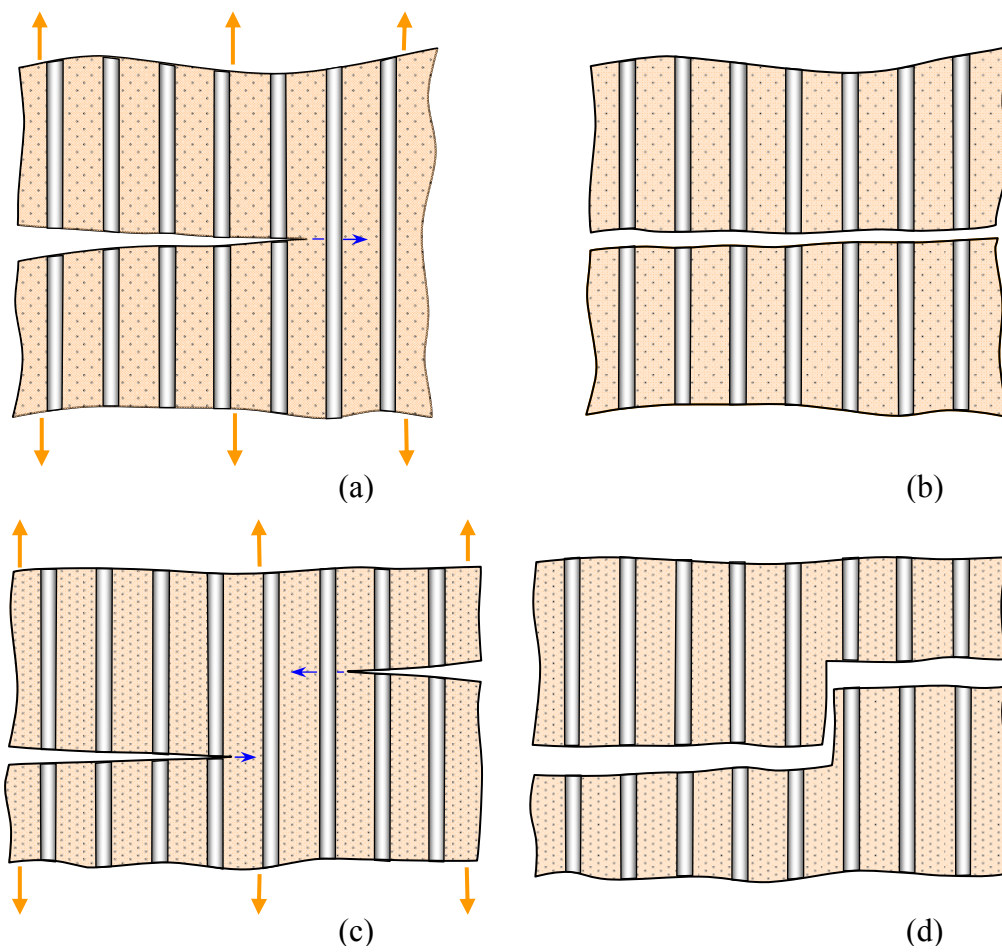


FIGURE 12.8. Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre-matrice.

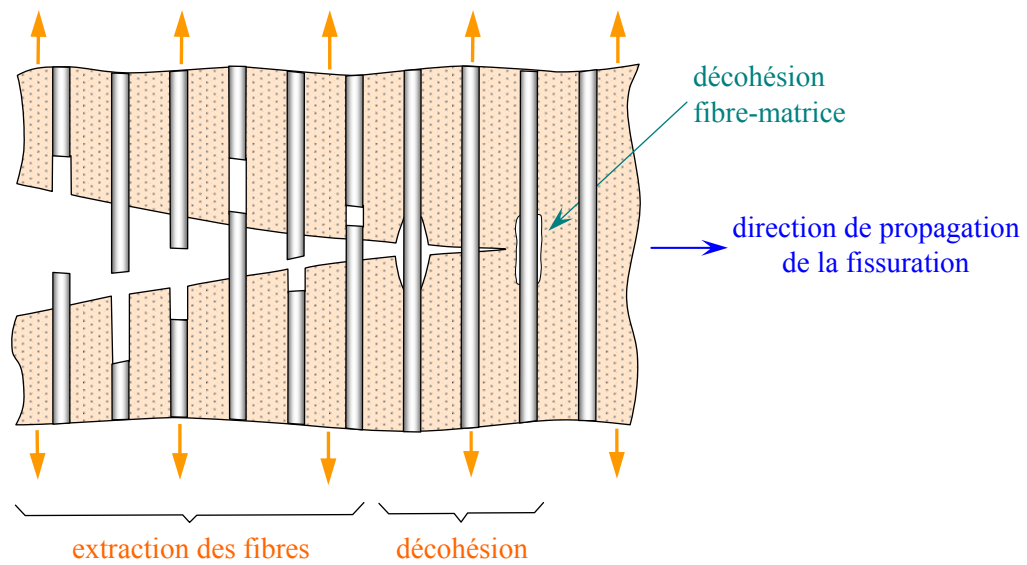


FIGURE 12.9. Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice.

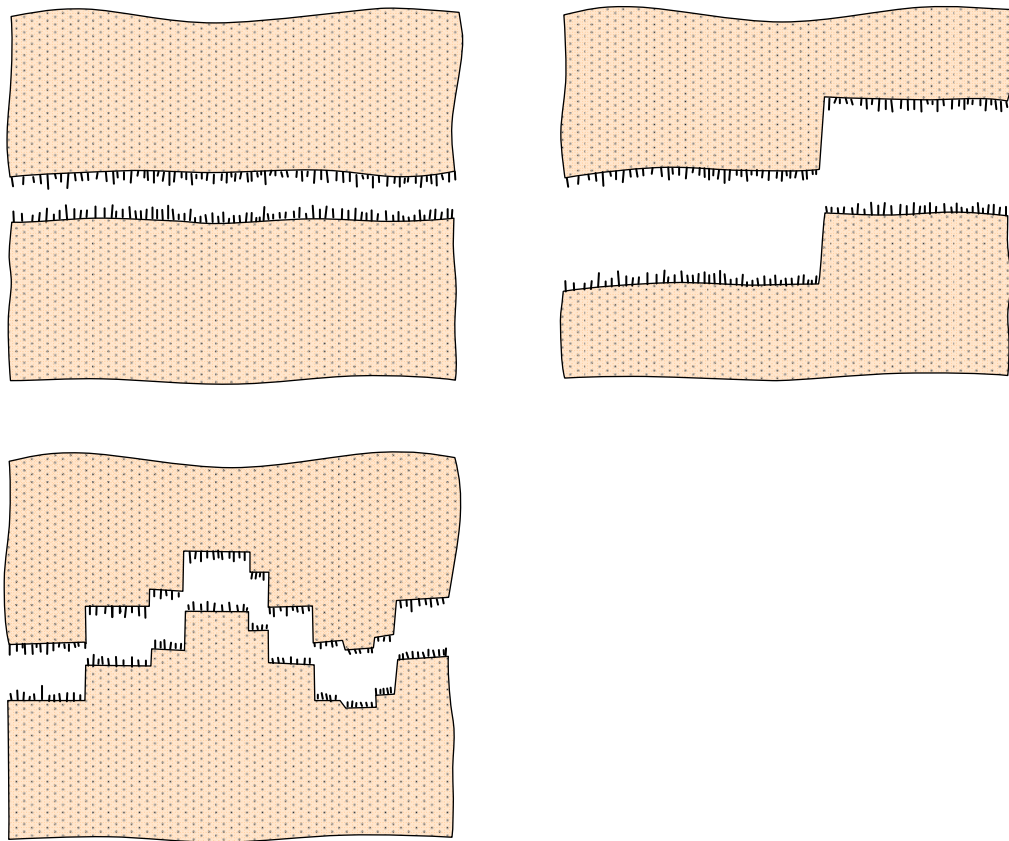


FIGURE 12.10. Surfaces de rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice.

une décohésion fibre-matrice avant rupture transverse de la matrice. En arrière, l'ouverture de la fissure induit des contraintes élevées dans les fibres pontant la fissure. Ces contraintes provoquent la rupture des fibres à une distance plus ou moins proche de la surface de rupture. La fissure continuant de progresser, les fibres rompues sont extraites de la fissure au fur et à mesure de la progression de la fissure. Le pontage des fissures transversales peut se faire par propagation de la rupture à l'interface fibre-matrice, conduisant à un profil plus ou moins en escalier de la surface de rupture (figure 12.10).

12.1.4 Composite unidirectionnel soumis à une traction transverse

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transverse, la rupture se produit soit par rupture de la matrice, soit par décohésion de l'interface fibre-matrice, suivant les caractéristiques à la rupture de la matrice et de l'interface. La rupture de la matrice se produit lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice (figure 12.11). Ce processus intervient lorsque la contrainte à la rupture de la matrice est

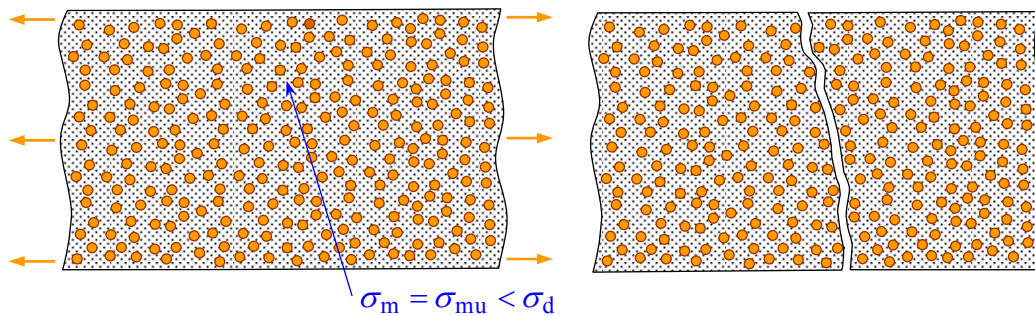


FIGURE 12.11. Rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transverse.

inférieure à la contrainte de décohésion σ_d en traction de l'interface fibre-matrice. Dans le cas contraire où $\sigma_{mu} > \sigma_d$, la rupture du composite se produit par rupture de l'interface fibre-matrice. Après initiation, la rupture se propage dans le matériau composite suivant une surface plus ou moins plane, dépendant des caractéristiques du matériau.

12.1.5 Rupture des stratifiés

Dans le cas de stratifiés, aux mécanismes élémentaires décrits précédemment (décohésion fibre-matrice, rupture longitudinale de la matrice, rupture transverse de la matrice, rupture de fibres), s'ajoute (figure 12.12) un mécanisme de rupture entre les couches, appelé rupture par *délaminage*. Les mécanismes de rupture induits dépendent de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé.

Par exemple, dans le cas d'un stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0° (figure 12.13), le premier phénomène de rupture observé est celui de la fissuration des couches orientées à 90° . La fissuration se produit par rupture longitudinale de la matrice ou/et par rupture de l'interface fibre-matrice dans les couches orientées à 90° . Cette fissuration conduit à la formation de fissures orientées transversalement (figure 12.14) à la direction du chargement mécanique. Ainsi, cette fissuration initiale des couches à 90° est appelée fissuration transverse du stratifié croisé. Lorsque le chargement mécanique est augmenté, le nombre de fissures croît jusqu'à atteindre un état de saturation de la fissuration. Les fissures transverses créent en pointes de fissures, entre les couches orientées à 90° et à 0° , des concentrations de contraintes qui conduisent à l'initiation puis à la propagation du délaminage à l'interface entre les couches. Ce délaminage se développe ensuite jusqu'à la rupture finale du stratifié par rupture des fibres et de la matrice dans les couches à 0° . La figure 12.14 montre l'aspect final de la surface après rupture.

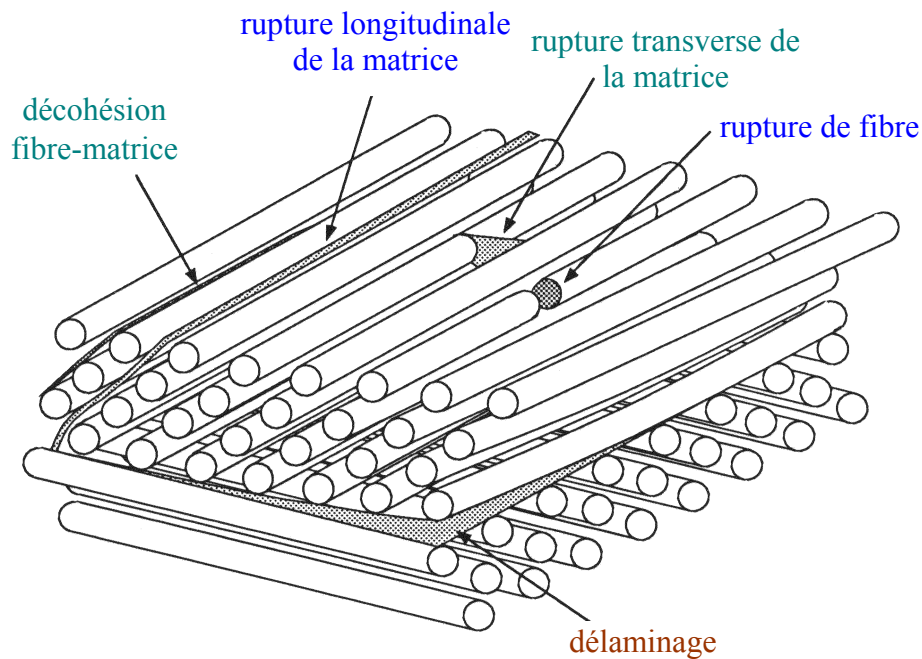
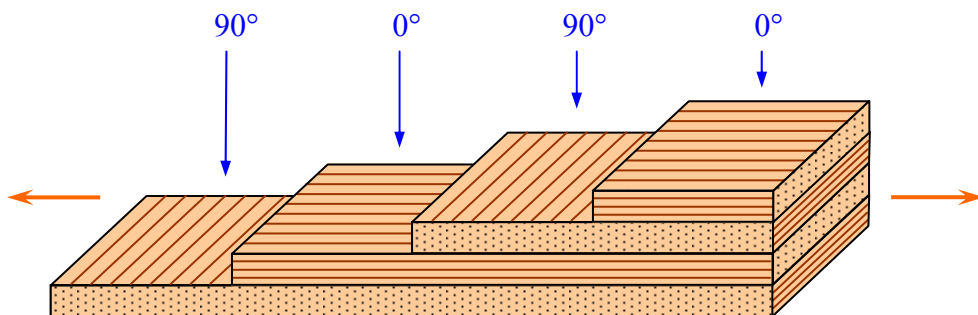


FIGURE 12.12. Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés.

FIGURE 12.13. Stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0° .

Dans le cas d'un stratifié croisé $\pm 45^\circ$, soumis à une traction longitudinale dans la direction 0° (figure 12.15), on observe d'abord une rupture longitudinale dans les couches à $\pm 45^\circ$, suivie d'un délaminage entre les couches. La figure 12.16 donne un exemple de rupture observé dans ce cas.

Un autre exemple intéressant est celui d'une plaque trouée, constituée d'un stratifié $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_n$ et soumise à une traction dans la direction 0° (figure 12.17a). Plusieurs phases de fissuration sont observées dans ce cas. Dans une première phase, il se produit une fissuration longitudinale de la matrice dans les couches à 90° (figure 12.17b). Dans une deuxième phase, on observe l'initiation de la fissuration dans les couches à $\pm 45^\circ$, à partir des fissures propagées dans les couches à 90° , avec une propagation limitée de ces fissures à $\pm 45^\circ$ (figure 12.17c). La troisième phase est marquée par l'apparition de fissures longitudinales,

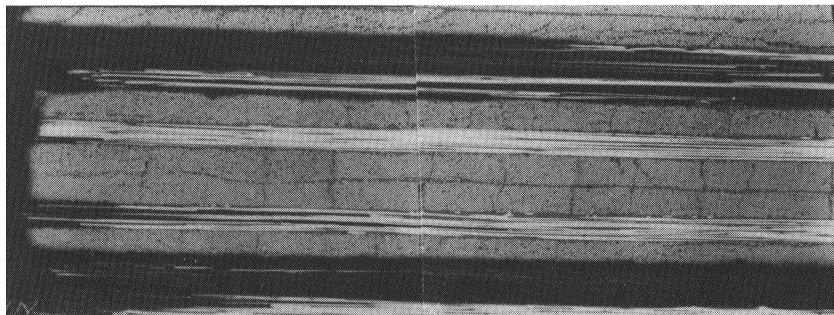
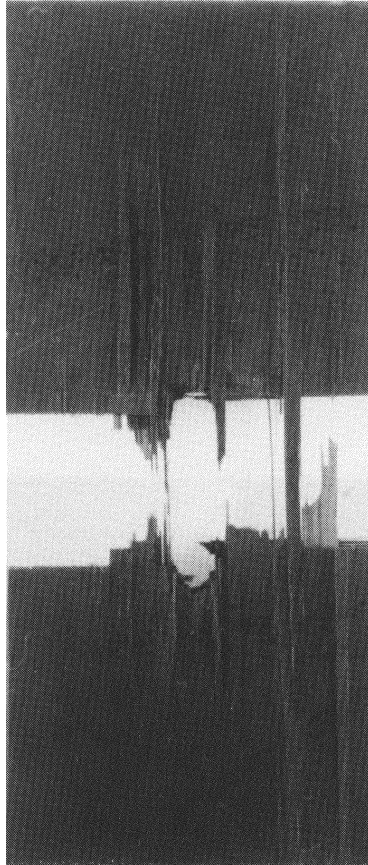


FIGURE 12.14. Rupture en présence d'un trou d'un composite $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ à fibres de carbone. (haut) Rupture macroscopique au droit du trou ($\times 1$). (bas) Bord de l'éprouvette loin du trou : les couches à 90° sont microfissurées (Document ONERA).

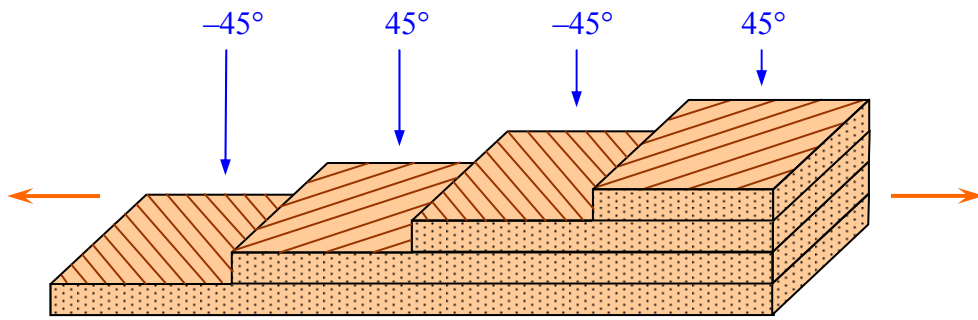


FIGURE 12.15. Stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction dans la direction 0° .

partant du trou, dans les couches à 0° . Ces fissures génèrent également des fissures secondaires à $\pm 45^\circ$ (figure 12.17d). Dans la dernière phase, les fissures à 0° produisent un délaminage des couches, suivi de la rupture des couches à 90° , puis des couches à 45° , et enfin d'une rupture des fibres dans les couches à 0° , conduisant à la rupture finale de la plaque.

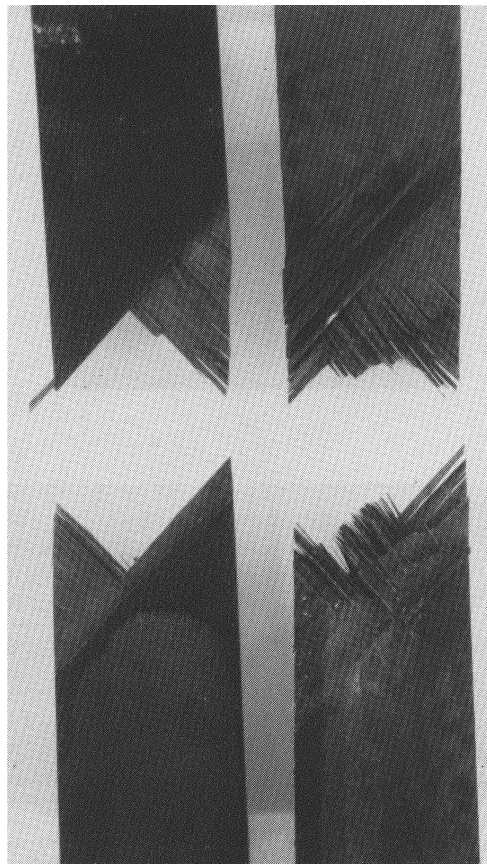


FIGURE 12.16. Rupture d'un composite $[\pm 45^\circ]_{2s}$ à fibres de carbone ($\times 1$) (Document ONERA).

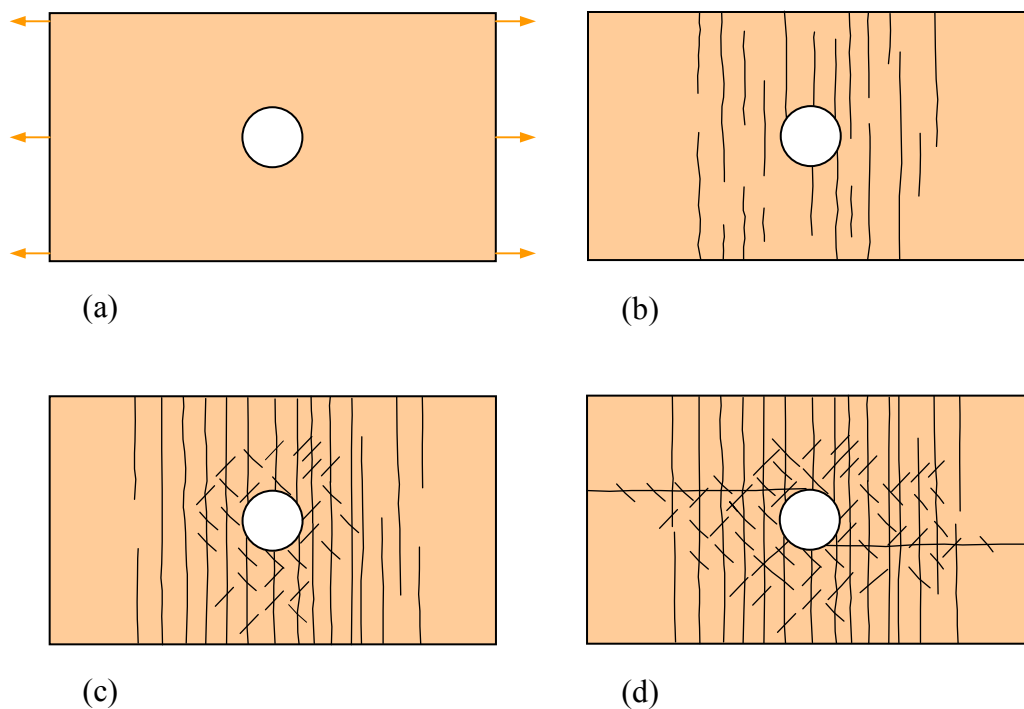


FIGURE 12.17. Fissuration d'un stratifié $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_n$. (a) Plaque avec un trou en son centre soumise à une charge de traction; (b) 1ère phase: fissuration dans les couches à 90° ; (c) 2ème phase: fissuration dans les couches à $\pm 45^\circ$; (d) 3ème phase: rupture dans les couches à 0° .

12.1.6 Observation des mécanismes de rupture

Le suivi des mécanismes de rupture peut être effectué par diverses techniques dont nous donnons quelques éléments dans ce paragraphe.

12.1.6.1 Observation par microscopie

La technique la plus simple à mettre en œuvre est l'observation à l'aide d'un binoculaire ou d'un microscope optique, permettant éventuellement une observation continue des phénomènes de rupture au cours des essais. L'observation est ponctuelle et la profondeur de champ limitée. La microscopie électronique à balayage augmente cette profondeur, tout en permettant d'atteindre des grossissements élevés. Les figures 12.18 et 12.19 montrent les micrographies obtenues dans le cas de la fissuration transverse de composites présentant une faible adhérence fibre-matrice (fig. 12.18) et une adhérence élevée (fig. 12.19).

12.1.6.2 Visualisation par radiographie

La technique de visualisation par radiographie X consiste à imprégner l'éprouvette fissurée à l'aide d'un opacifiant (type iodure de zinc) et à faire ensuite une radiographie X de l'éprouvette. La radiographie donne une image 2D de l'état