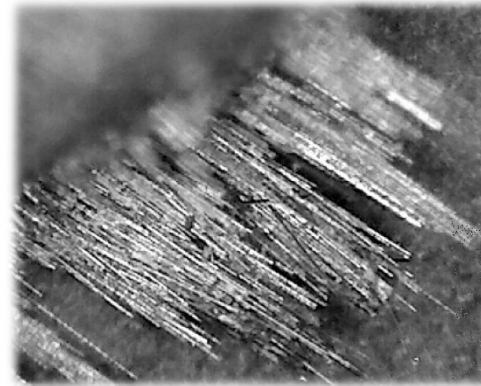




Observation par microtomographie de la rupture dans un composite ± 45 chanvre/époxy.

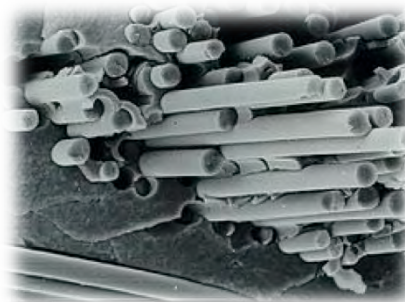


A detail view of a broken carbon fiber cylinder

Matériaux composites

PARTIE 2 : Comportement mécanique des composites

Chapitre 3 : Mécanismes de rupture et endommagement des matériaux composites



Surface de cassure d'un composite constitué de fibres de SiC et d'une matrice de SiC.

Photo: MT Aerospace AG, Augsburg

Vanessa Bouchart

Introduction

Défaillances mécaniques des composites : tout autre nature que celles des matériaux métalliques: rupture par fatigue moins à craindre.

Les causes d'endommagement : concentrations de contraintes autour des entailles, trous et le dédoublement des composites par **délaminage**.

La rupture d'un composite est précédé par un **endommagement microscopique** au développement lent et prévisible contrairement au rupture pas clivage des aciers.

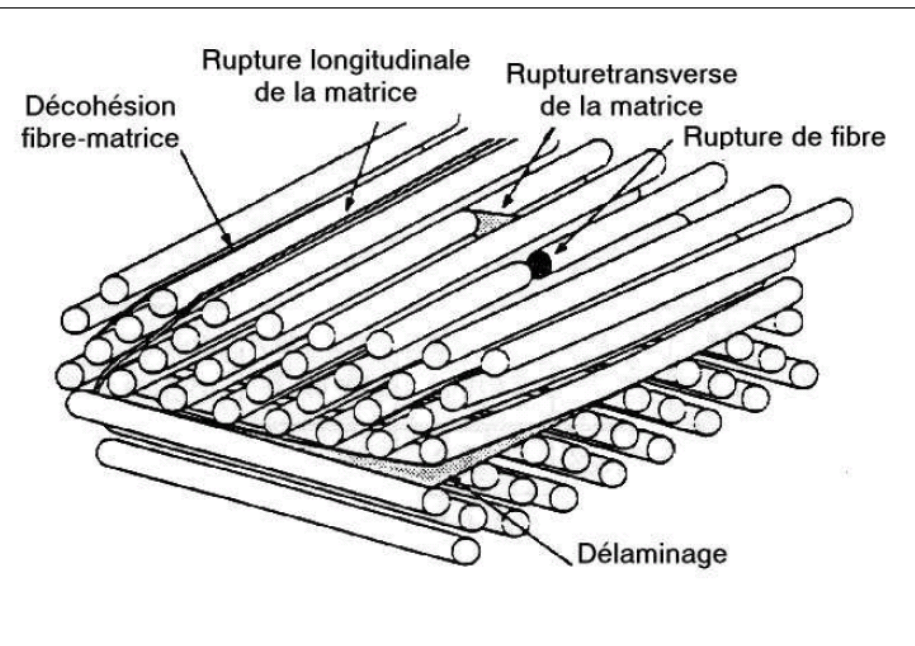
Endommagement microscopique:

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

- Rupture des fibres
- Rupture transverse de la matrice
- Rupture longitudinale de la matrice
- Rupture de l'interface fibre-matrice

Ces mécanismes coexistent avant rupture et se développent selon:

- la nature du matériau
- les conditions de sollicitations mécaniques imposées



Introduction

Mécanique de la rupture des composites : le comportement à la rupture des composites est influencé par différents facteurs qui en compliquent l'analyse et la possibilité de saisir le phénomène avec un critère général et fiable comme pour les matériaux homogènes et isotropes.

L'hétérogénéité peut influencer la rupture locale de différentes manières:

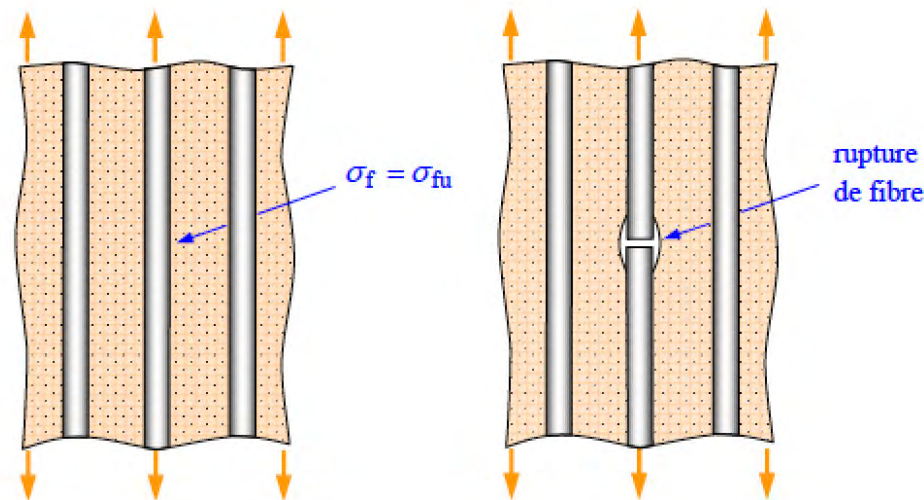
- pull-out (décollement des fibres et matrice);
- instabilité locale des fibre en compression;
- influence sur la propagation des fissures;
- différente résistance en traction et en compression.

Problèmes typique des stratifiés : en mécanique des stratifiés, on trouve des phénomènes et problèmes inconnus dans les matériaux classiques, comme par exemple:

- délaminage: rupture interlaminaire provoquée par les contraintes interlaminaires
- contraintes résiduelles: leur présence dépend beaucoup du processus de fabrication; en particulier, si polymérisé à chaud un stratifié sera toujours soumis à des contraintes interlaminaires résiduelles qui peuvent être très importantes et surtout d'évaluation difficile;
- contraintes aux bords: on peut montrer, par des modèles analytiques, qu'en fonction de la séquence d'empilement et du chargement, on peut avoir une concentration des efforts aux bords libres, qui peut être même très importante et provoquer le délaminage;
- analyse de la rupture: la rupture complète d'un stratifié est un phénomène progressif et souvent difficile à saisir, aussi bien au niveau analytique que, pour ce qui concerne son évolution, expérimental.

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Composite unidirectionnel

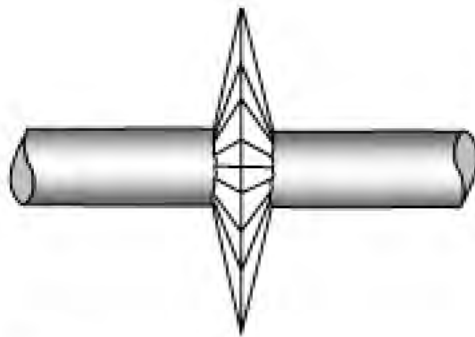


Dans un matériau composites unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture intervient lorsque la contrainte de traction (σ_f) dans une fibre atteint la contrainte ultime (σ_{fu}) de la fibre. La rupture de la fibre crée une concentration de contrainte au voisinage de la rupture. La redistribution des contraintes et par conséquent le processus de rupture résultant, dépend principalement :

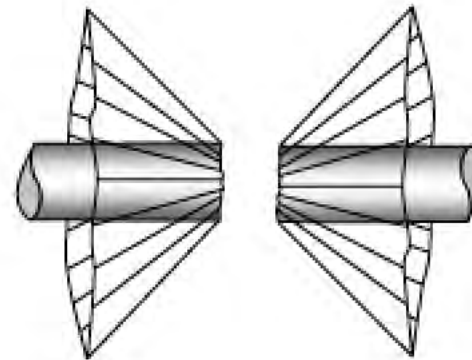
- de la contrainte à la rupture des fibres
- de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée
- des propriétés de l'interface fibres/matrice

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre :



(a)



(b)



(c)



(d)

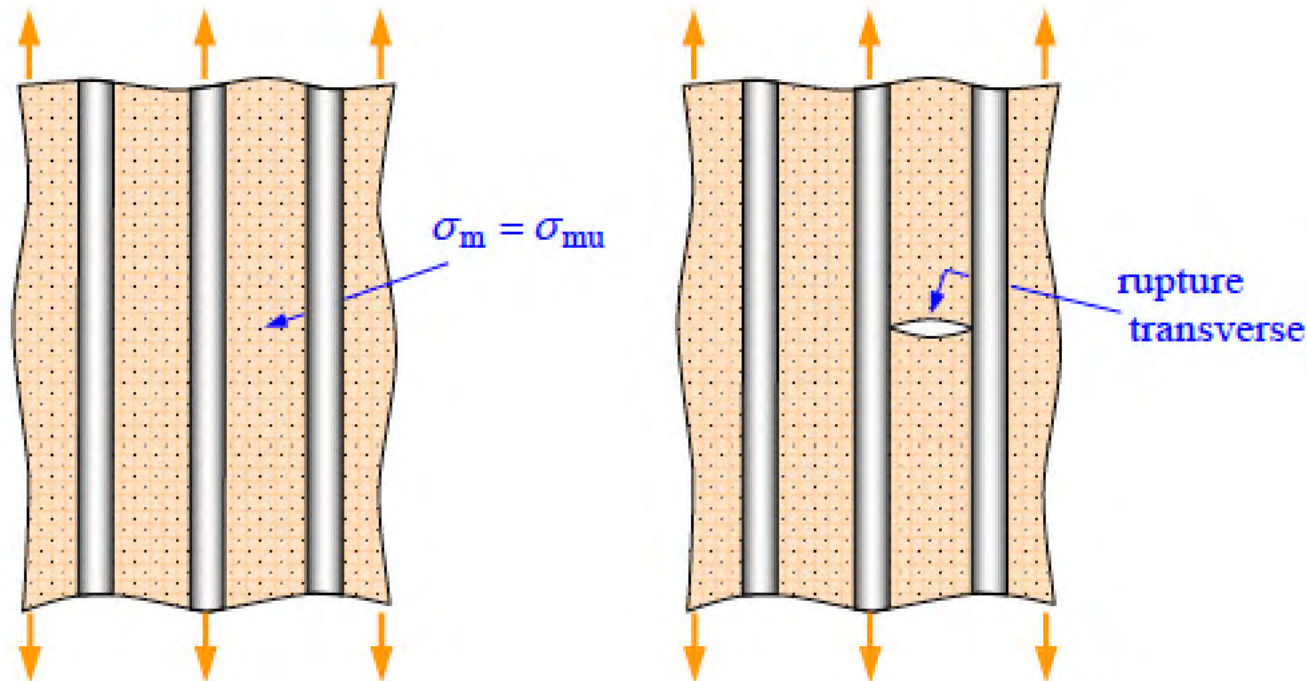
(a) Rupture transverse de la matrice ; (b) Rupture en cisaillement de la matrice ; (c) Décohésion de l'interface fibre-matrice ; (d) Rupture longitudinale de la matrice.

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

La fissuration de la matrice peut se produire:

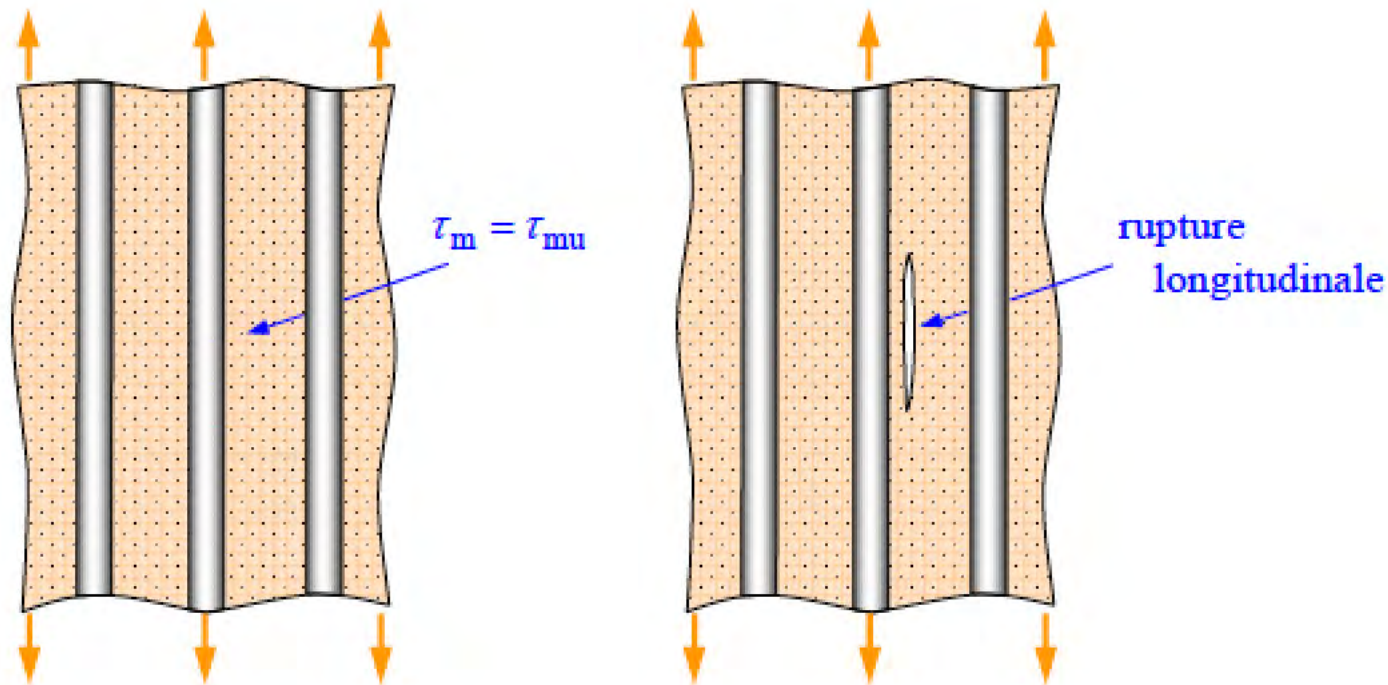
- soit **par fissuration transverse**

lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice,



Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

- soit par **fissuration longitudinale** lorsque la contrainte de cisaillement τ_m dans la matrice atteint la contrainte de cisaillement ultime τ_{mu} , généralement au voisinage d'une fibre.

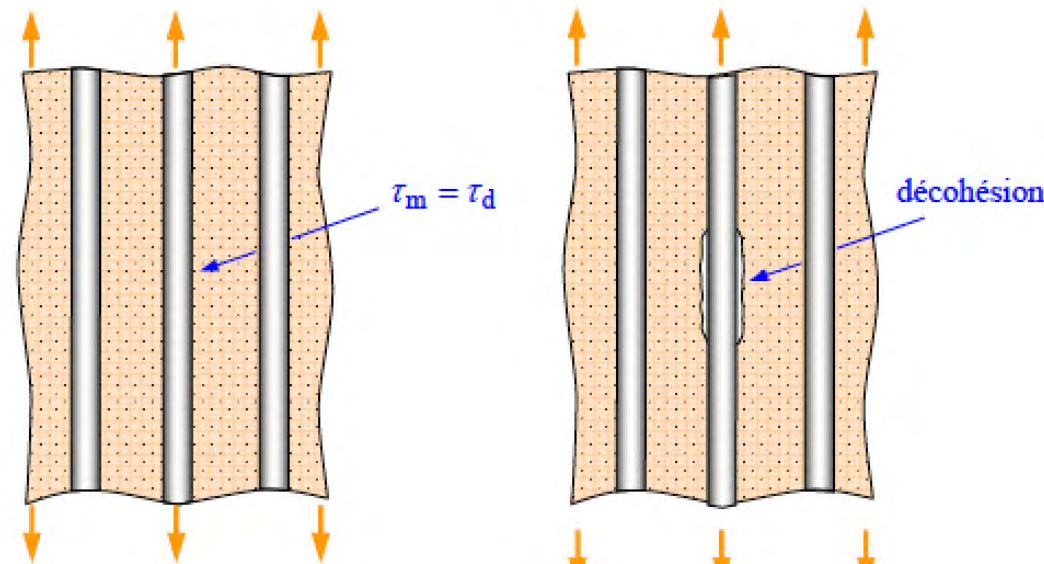


Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Ce dernier mode de rupture appelé « splitting », se produit lorsque la contrainte de décohésion 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 décohésion de l'interface fibre-matrice.



La rupture final d'un matériau composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de ces divers mécanismes.

Dépendance aux propriétés des fibres et de la matrice et de l'interface, de la fraction volumique et des sollicitations

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Composite unidirectionnel en traction longitudinale, l'initiation de la rupture se fait soit:

- par rupture des fibres lorsque la déformation à rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$
- par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire $\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{mu}$

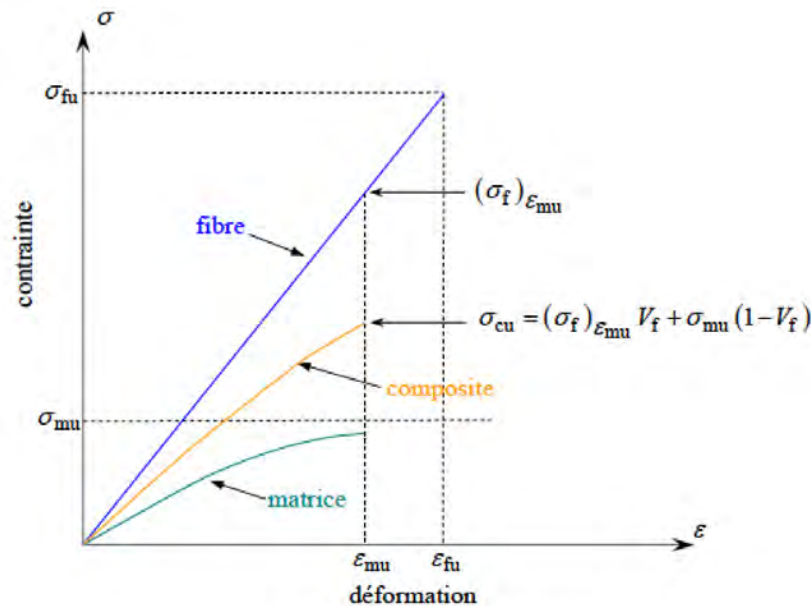


FIGURE 12.7. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{mu}$.

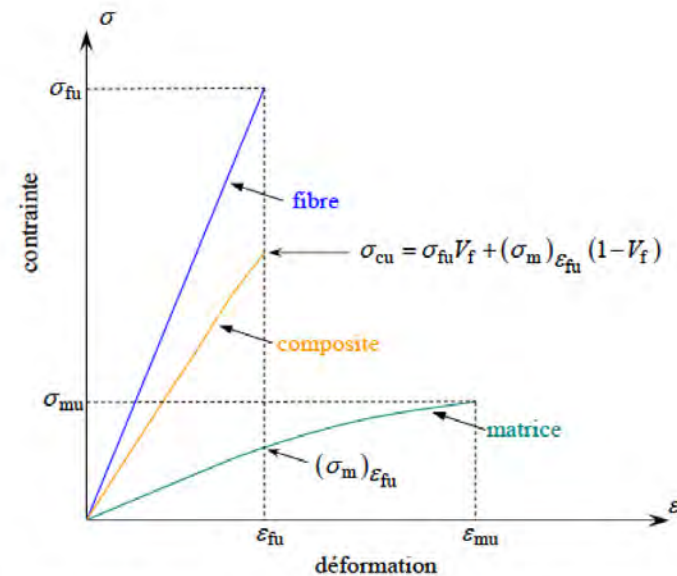


FIGURE 12.6. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$.

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Composite unidirectionnel en traction longitudinale

Caractéristiques mécaniques des fibres usuelles :

- fibres de carbone
 - Haute résistance : $E_f=220\text{GPa}$ $\sigma_{fu}=3000$ à 4000MPa soit $\epsilon_{fu}=1.4$ à 1.8%
 - Haut module : $E_f=400\text{GPa}$ $\sigma_{fu}=2200\text{MPa}$ soit $\epsilon_{fu}=0.5\%$
- fibres de verre E :
 $E_f=70\text{GPa}$ $\sigma_{fu}=2400$ à 3400MPa soit $\epsilon_{fu}=3.4$ à 4.8%

Allongement à rupture des résines usuelles :

- polyesters $\epsilon_{mu}=2$ à 5%
- résines phénoliques $\epsilon_{mu}=2.5\%$
- résines époxydes $\epsilon_{mu}=2$ à 5%

→ En utilisation industrielle, les résines sont assez fortement chargées

→ diminution de la déformation à rupture de la matrice

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Composite unidirectionnel en traction longitudinale

Ces chiffres montrent que les performances à la rupture des composites HP (fibres de carbone) sont gouvernées par les propriétés à la rupture des fibres.

Par contre, les composites à fibres de verre, les performances à la rupture peuvent être limitées par une déformabilité trop faible de la matrice par rapport à celle des fibres.

→ Nécessité d'adapter les propriétés de la matrice à celles des fibres pour optimiser les performances à la rupture des composites

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Composite unidirectionnel en traction longitudinale

Propagation de la rupture suivant la nature de l'interface fibre/matrice

Forte adhérence fibre/matrice

Concentration de contraintes en front de fissure → propagation successivement dans les fibres et dans la matrice

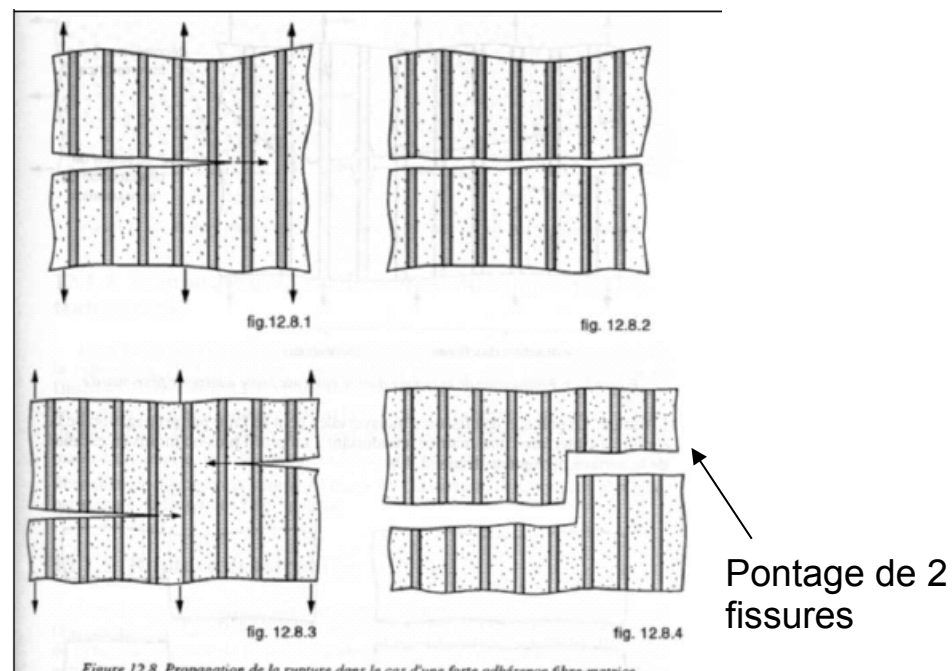
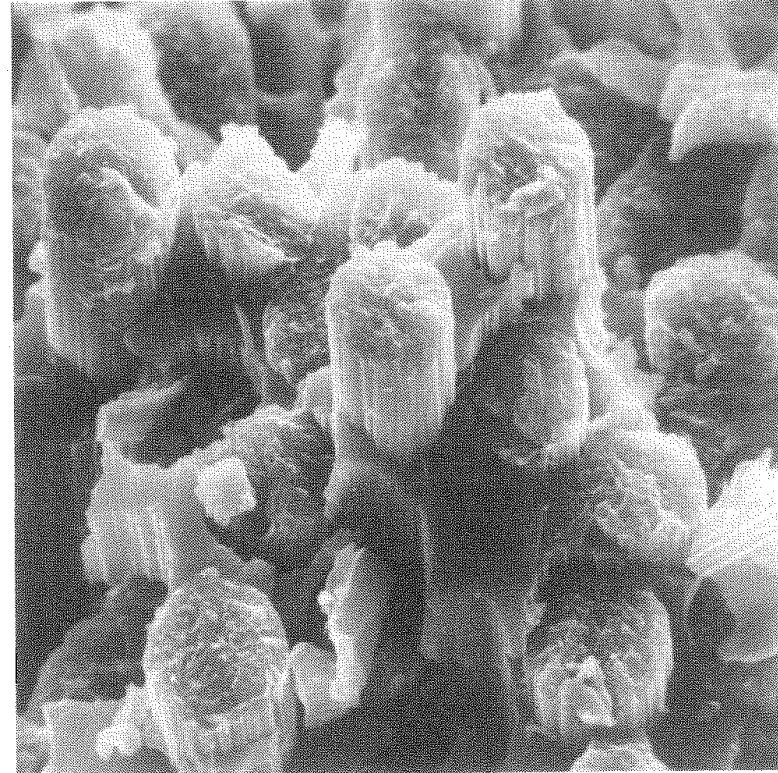
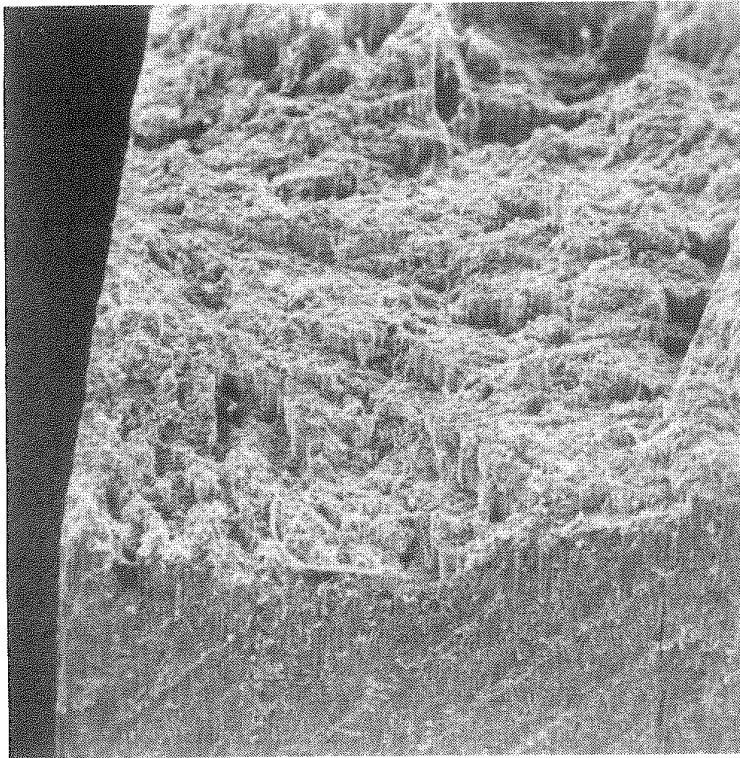


Figure 12.8 Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre-matrice

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Forte adhérence fibre/matrice



« forte » adhérence fibre-matrice dans le cas d' un composite à fibres de carbone

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Composite unidirectionnel en traction longitudinale

Propagation de la rupture suivant la nature de l'interface fibre/matrice

Faible adhérence fibre/matrice

La rupture traverse les fibres sans rupture de celle-ci mais avec décohesion de l'interface fibre/matrice.

- En tête de fissure, on a une concentration de contraintes

→ rupture transverse de la matrice

- En arrière, l'ouverture de la fissure

→ contraintes élevées dans les fibres

→ rupture des fibres à une distance + ou – proche de la surface de rupture

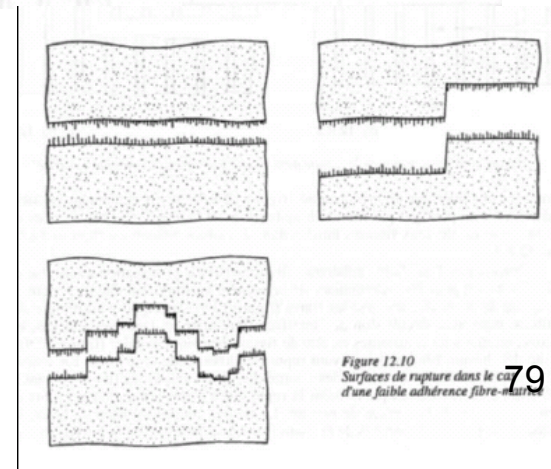
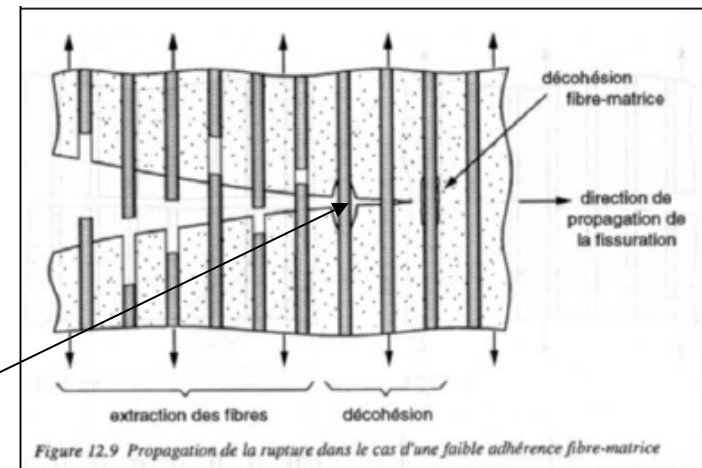
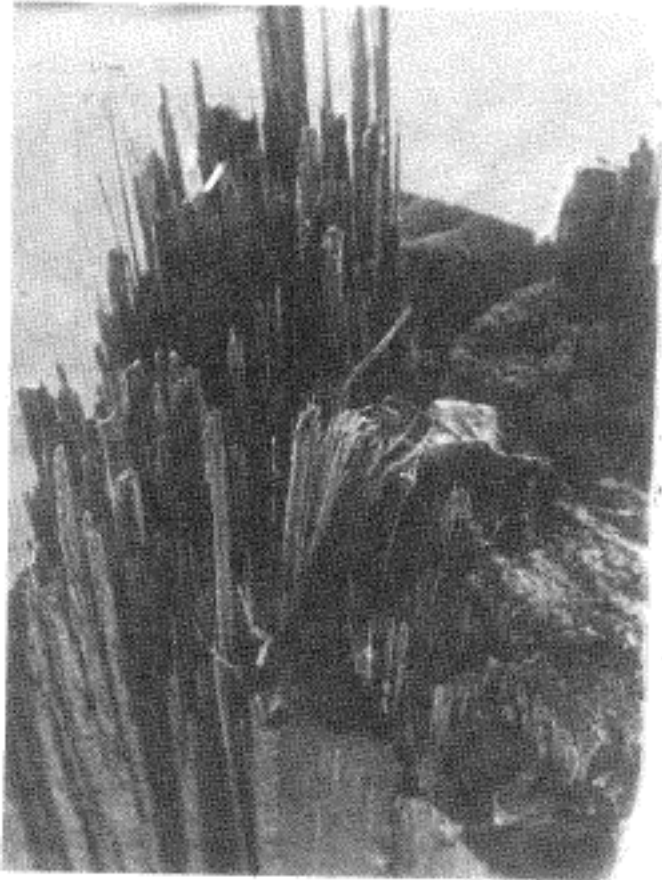
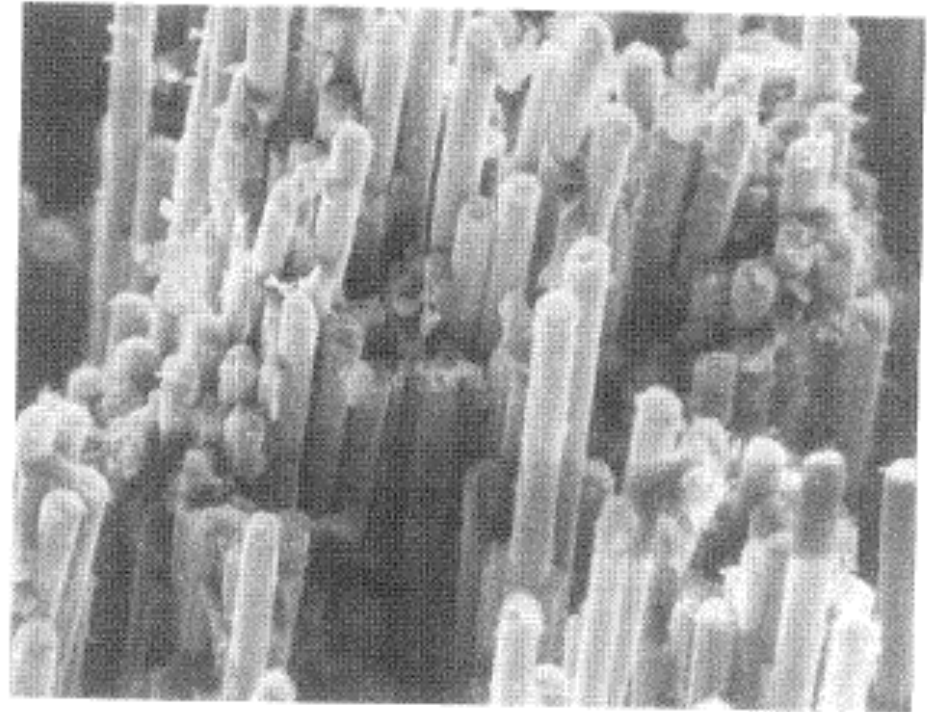


Figure 12.10
Surfaces de rupture dans le cas
d'une faible adhérence fibre-matrice

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites



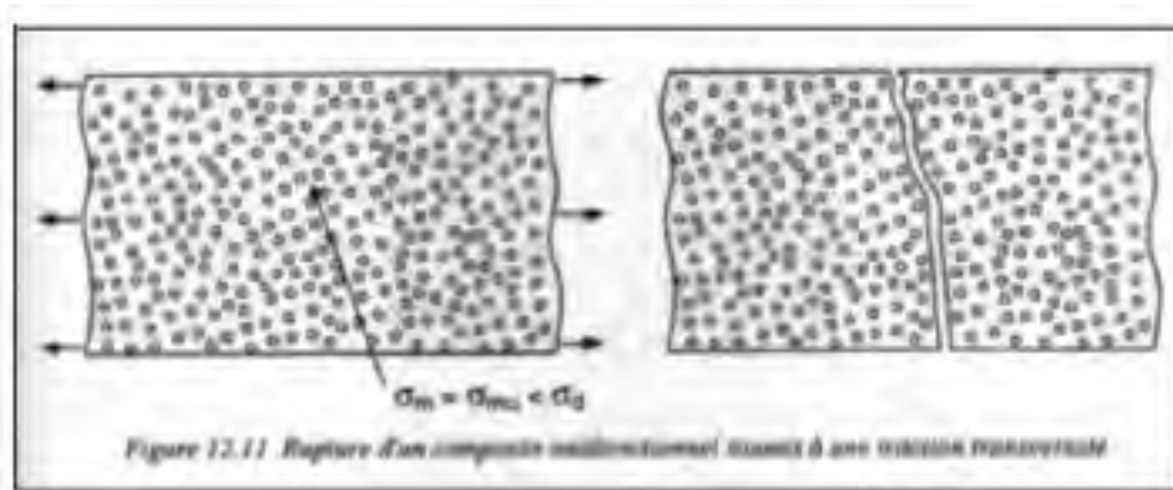
Faible adhérence fibre/matrice



« faible » adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

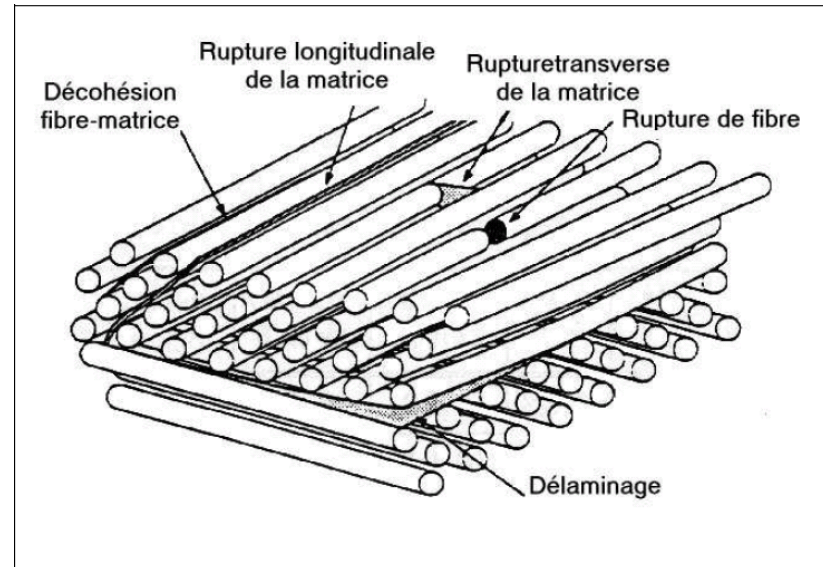
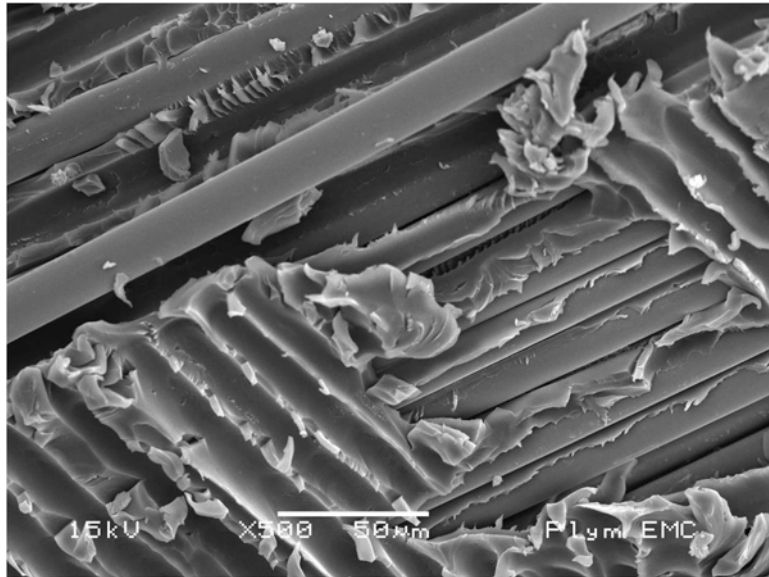
Composite unidirectionnel en traction transversale



Rupture par rupture de la matrice ou par décohésion de l'interface fibre/matrice

Les mécanismes de rupture dans les matériaux composites

Rupture des stratifiés



S'ajoute aux mécanismes élémentaires (décohésion fibre – matrice, rupture longitudinale ou transverse de la matrice, rupture de fibres), un mécanisme de rupture en couches : **le délaminage**.

Il dépend de :

- la nature des constituants
- l'architecture des couches
- du mode de sollicitation mécanique

Observation des mécanismes de rupture

Méthodes directes d'observation :

- Contrôle visuel : plus simple des moyens, pourtant il permet de donner parfois des informations précises sur les zones endommagées
- radiographie X (contrôle non destructif)

Méthodes indirectes d'observation:

- Tap test : fréquemment utilisé dans l' aéronautique.
- Thermographie infrarouge
- Emission acoustique
- Echographie ultrasonore
- Fractographie

Observation des mécanismes de rupture

Radiographie X

- **Méthode frontale** : non destructive, contrôle de répartition des fibres, parasites inclusions. On ne voit pas le délaminage.
- **Méthode transversale** : destructive, rhéologie des écoulements dans l'empreinte de l'outillage.
- **Visualisation de l'endommagement** : observation fine : substance absorbante diffusée dans le matériau.

Tetrabromoéthane , Iodure de Zinc en solution, eau/alcool isopropylique

Très fort coefficient d'étalement → microfissure mais pas délaminage.

Deux photos sous deux angles différents vision en relief : distinguer chaque pli.

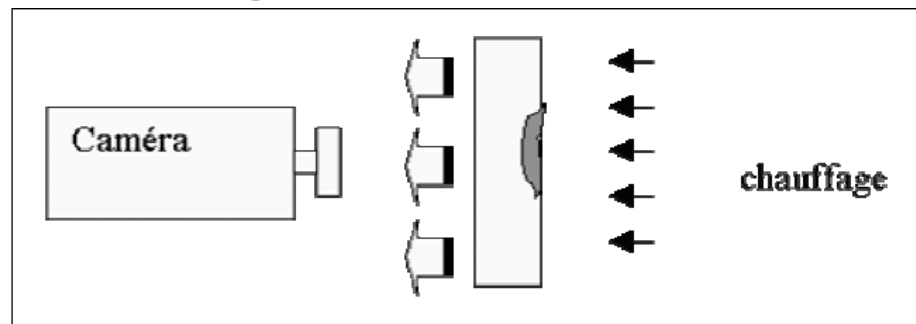
Observation des mécanismes de rupture

Tap test

Ce test est fréquemment utilisé dans l' aéronautique pour déterminer les zones endommagées ou celles de défauts (délaminage). Ce test consiste à taper légèrement la structure en plusieurs endroits pour détecter les zones de variation de ton et qui sonnent creux.

Ce test simple peut être utilisé directement par les techniciens chargés de la maintenance et donne des résultats relativement fiables pour certains types de dommage (ex : décollement d' interface).

Thermographie infrarouge



- Permet d'obtenir une cartographie thermique du composite. Les échauffements locaux sont reliés à la densité d'endommagement. Méthode plus qualitative que quantitative.
- Exemple d'utilisation : suivi d'endommagement en essai de fatigue, de rupture progressive autour d'un trou, influence de la séquence d'empilement.

Observation des mécanismes de rupture

Fractographie

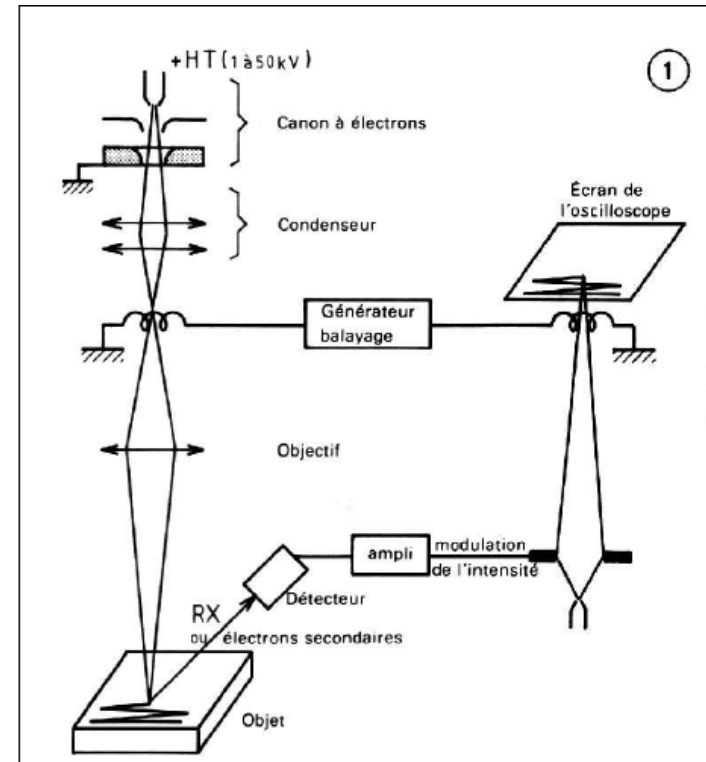
Analyse des surfaces de rupture à posteriori (M.E.B.)
microscope électronique à balayage :

- obtention d'images d'un fort grossissement pour analyser les phénomènes microscopiques de l'ordre de quelques microns (faciès de rupture).

Moyens nécessaires relativement lourds:

- polir et parfois métalliser les échantillons dans le cas où ils ne seraient pas conducteurs (en particulier pour les fibres de verre).

D'autres part la découpe des éléments que l'on veut analyser doit être fine puisque les dimensions de ceux-ci sont limitées à la taille du caisson. Dans ce caisson on réalise le vide puis on injecte un gaz d'argon pour faciliter le bombardement d'électrons.



- **Expertise** (méthodes très courantes pour les métaux). Pour les composites : pas très net, du à la diversité des constituants, anisotropie, taux de fibre...
- Beaucoup plus difficile.
- Il existe beaucoup d'autres méthodes : tomographie X...

Observation des mécanismes de rupture

Emission acoustique et Echographie ultrasonore

Contrôle non destructif

Emission Acoustique (AT) : permet de détecter, localiser et identifier des endommagements évolutifs sous l'action d'une sollicitation mécanique et / ou thermique.					
Ultrasons (UT) : permet de caractériser des endommagements ou défauts de conception de très petites dimensions.					
Acousto-Ultrasons (AU) : permet de détecter et localiser des endommagements dans des matériaux très absorbants et composites épais.					
	Méthode statique / dynamique	Méthode globale / locale	Temps réel	Type d'endommagements	Matériaux atténuants
AT	Dynamique (Sollicitation de la structure)	Globale	Oui	Délaminage, rupture de fibre, fissure matricielle, frottement, décollement, ...	+
UT	Statique	Locale	Non	Discontinuité (interface de matériau, trou, ...), délaminage, décollement, porosité ...	-
AU	Statique	Globale / Locale	Non	Discontinuité (interface de matériau, trou, ...), délaminage, décollement, ...	++

Ces méthodes sont capables de surveiller l'endommagement en temps réel dans les composites que ce soit pour le suivi de l'intégrité des structures en service ou pour l'étude des mécanismes de rupture

Observation des mécanismes de rupture

Emission acoustique

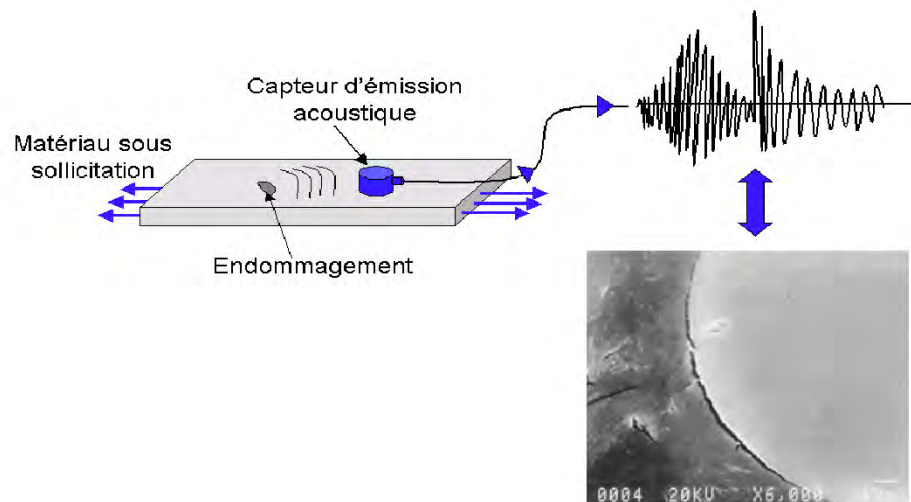
DEFINITION

émission acoustique = « phénomène de création d'ondes élastiques transitoires résultant de microdéplacements internes dans un matériau » (norme française AFNOR)

Lors de sollicitation, l'énergie emmagasinée est dissipée créant des microdéplacements se retrouvant sous forme d'**ondes élastiques** : c'est l'**émission acoustique**.

Ces ondes atteignent la surface → détection grâce au capteur piézoélectrique.

Signal acoustique parfois audible : « cri du matériau »



Rupture (fibre, matrice, interfaces)

ondes, bruit

Capteurs (50-500kHz).

Figure 5 : Processus du contrôle non destructif par émission acoustique

Observation des mécanismes de rupture

Emission acoustique

CARACTERISTIQUES DE L'EMISSION ACOUSTIQUE

2 types d'émission acoustique:

- **discontinue** : onde sinusoïdale amortie : salve ou événement

Origine : mécanismes très énergétiques comme la propagation de fissure conduisant à la rupture

- **continue** : ensemble d'émissions discrètes (discontinues) dont les salves sont très rapprochées et ne peuvent pas être séparées les unes des autres.

Principalement liée à des phénomènes de déformation plastique

Observation des mécanismes de rupture

Emission acoustique

PARAMETRES D'EMISSION ACOUSTIQUE DISCRETE

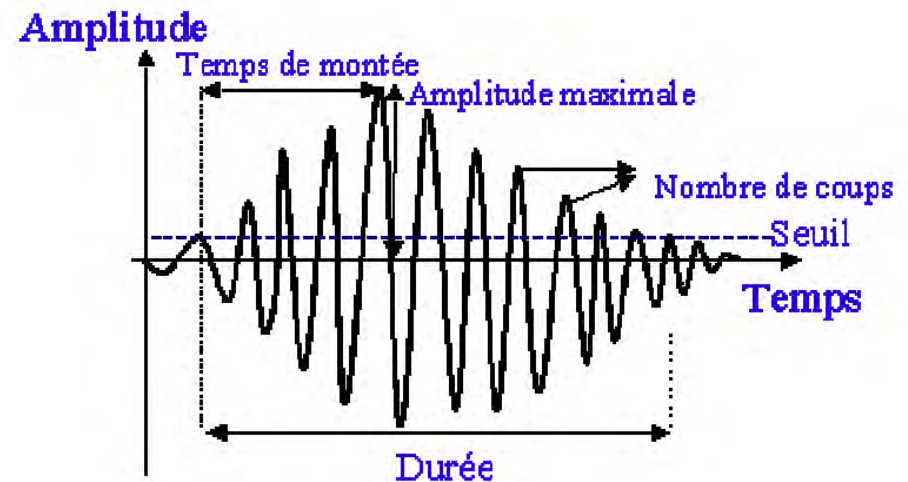
Chaque salve est liée à un événement d'endommagement dans le matériau

➔ Analyse des différents paramètres qui caractérisent la salve pour identifier le type d'événement

Une salve est définie par rapport à un seuil d'acquisition et est bornée par la 1^{ère} et dernière arche dépassant le seuil.

Paramètres classiques :

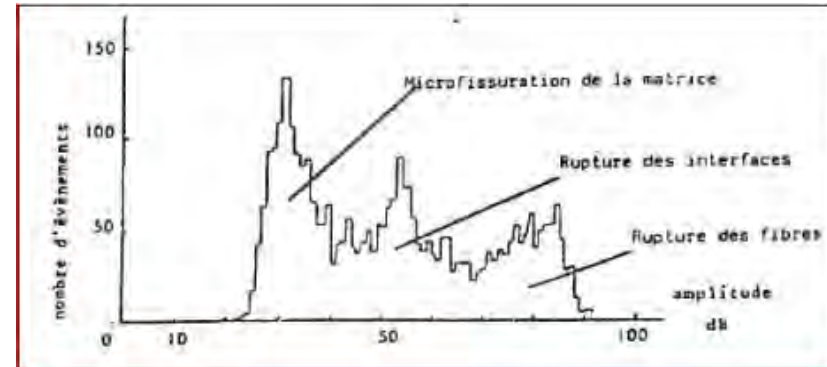
- nombre de coups
- amplitude maximale
- énergie du signal
- durée de la salve en microsecondes
- temps de montée du signal
- nombre de coups au pic
- fréquence moyenne : nombre de coup d'une salve sur sa durée



Observation des mécanismes de rupture

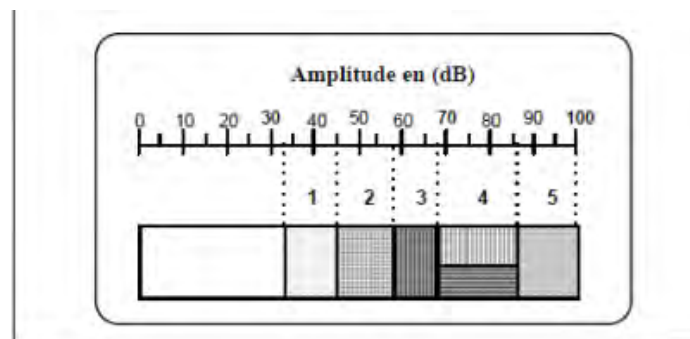
Emission acoustique

Pour éviter les bruits parasites, on ne tient compte en général que des émissions supérieures à 33dB. La mesure de l'amplitude des événements permet de tracer des courbes nombre d'événements/amplitude de la forme suivante :



Modèle schématique d'E.A. pour identifier l'endommagement. Les mécanismes d'endommagement numérotés de 1 à 5 sont définis comme suit:

- 1, 33-45 dB : micro-fissuration de la matrice,
- 2, 46-58 dB : coalescence des microfissures ,
- 3, 59-68 dB : rupture de l'interface,
- 4, 69-86 dB : frottement fibre / matrice, déchaussement des fibres,
- 5, 87-100 dB : rupture des fibres.



Observation des mécanismes de rupture

Emission acoustique

ACQUISITION DES SIGNAUX D'EMISSION ACOUSTIQUE

Utilisation de capteur piézoélectrique placé en surface du matériau et couplé avec l'échantillon avec un couplant visqueux (graisse silicone)

Rôle du couplant: assurer et améliorer la transmission des ondes entre la surface de l'échantillon et le capteur.

2 types de capteur:

- **large bande** allant jusqu'au MHz, faible sensibilité
- **résonnant** de bande passante moins large et pic de réponse au alentour d'une certaine fréquence (résonance) → bon choix du capteur selon le signal émis par le matériau afin de détecter les sources d'émission acoustique **même faible**

LOCALISATION DES SOURCES D'ENDOMMAGEMENT

Détermination des coordonnées de la zone où s'est produit l'événement acoustique

→ **Utilisation de plusieurs capteurs**

Mesure des différences de temps d'arrivée (Δt) d'un même signal à plusieurs capteurs répartis sur la structure.

Observation des mécanismes de rupture

Caractérisation ultrasonore

Outil privilégié pour le contrôle et l'évaluation non destructifs des propriétés mécaniques des matériaux.

Avantage: adapté à une large gamme de matériaux

Ultrasons : ondes sonores qui se propagent dans les milieux élastiques à fréquence $> 20000\text{Hz}$

Principe de base : Envoi d'une onde élastique par l'intermédiaire d'un transducteur dans le matériau à contrôler

2 modes principaux d'utilisation des ultrasons:

- **au contact** : transducteurs ultrasonores directement placés sur les faces de l'échantillon (agent de couplage)
- **en immersion** : transducteur situé à distance de la pièce. Le couplage est assuré par un liquide (eau)

Caractéristiques principales exploitées:

- vitesse de propagation dans le milieu, qui est directement associée à la densité du matériau et ses propriétés élastiques
- atténuation dans le matériau, qui est liée à la viscosité du matériau

Observation des mécanismes de rupture

Caractérisation ultrasonore

Acquisition des données

Nécessité d'utiliser 2 transducteurs permettant de convertir

- lors de l'émission, l'énergie électrique en énergie mécanique
- lors de la réception, l'énergie mécanique en énergie électrique

Utilisation des transducteurs en transmission : le récepteur est disposé face à l'émetteur et recueille l'énergie qui a été transmise à travers la pièce.

Détermination des vitesses de propagation et lien avec les propriétés mécaniques

Viscoélasticité d'un milieu se traduit par une dispersion et atténuation des signaux ultrasonores

Les vitesses de propagation sont liées aux propriétés mécaniques du matériau (équation de propagation d'onde et loi de comportement) → indicateur d'endommagement