

# ● ANALYSE FRACTOGRAPHIQUE EN EXPERTISE DE PIÈCES COMPOSITES

Page 1

Benoit POITOU

Benoit.POITOU@cetim.fr / Tel : 02.40.37.36.52

## SOMMAIRE :

- 1) **Introduction**
  - CETIM / IPC
  - Fractographie et analyse de défaillance
  
- 2) **Démarche et modes de ruine**
  
- 3) **Etude de cas**
  - poutre composite

# 1. INTRODUCTION



## *CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES MECANIQUES*

Page 2

CETIM :  $\approx$  700 salariés

Analyse de Défaillance et Expertise (ADE) : environ 40 personnes,

ADE multi-compétences, organisé au travers de plusieurs départements :

- Matériaux métalliques et surface,
- Ingénierie des polymères et composites
- Métrologie - Etalonnage
- Contrôle et mesure : CND
- Technologie de l'étanchéité
- Technologie des fluides et écoulements
- Technologie de production : assemblage, process, usinage

# 1. INTRODUCTION

## *INGENIERIE DES POLYMERES ET COMPOSITES*

### 4 produits

● Aide à la conception et industrialisation de produits



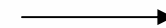
Passage du métal au composite

● Ingénierie peintures



Optimiser les chaînes et process de mise en peinture

● Caractérisation / Qualification des matériaux et des structures



Essais mécaniques, modélisation, prévoir le comportement des matériaux

● Analyse de Défaillance et Expertise



Expertises judiciaires,  
Expertises d'assurances  
Expertises auprès d'industriels

# 1. INTRODUCTION

## Analyse de défaillance des pièces polymères et composites

Analyses les plus fréquentes :

- Analyses chimiques et thermiques (IRTF, DSC, ATG)
- Essais mécaniques (traction, compression, ...)
- Contrôle non destructif (tomographie, RX, US)
- **Fractographie**
- Calcul par éléments finis

# 1. INTRODUCTION



Page 5

## Fractographie des pièces polymères et composites

Objectif : déterminer l'origine de la rupture (démarche qualitative) en observant les faciès

- Mécanique : surcontrainte, fatigue/vibration, fluage

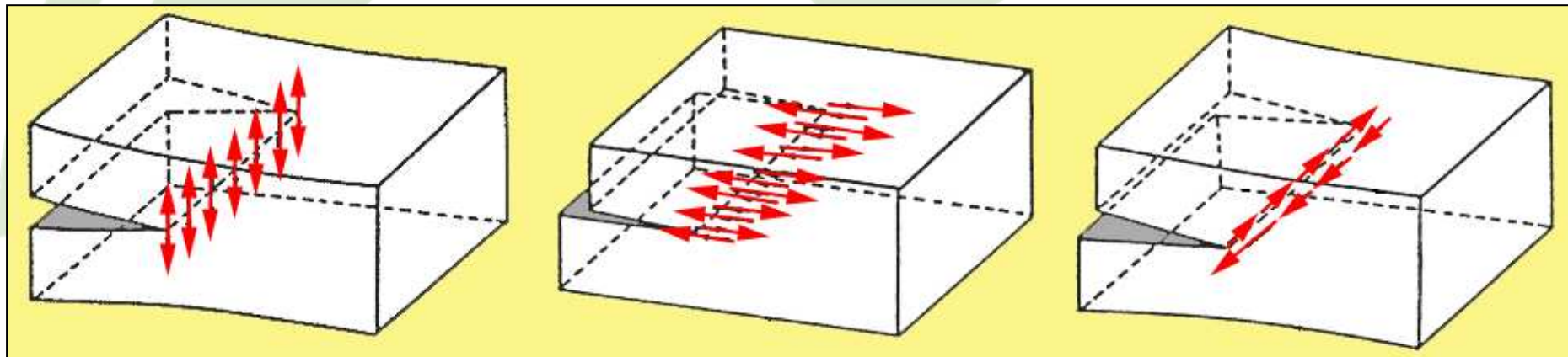
*permet de définir le mode de sollicitation (traction, flexion, cisaillement...)*

- Attaque chimique
- Vieillessement (chimique, physique, combiné)
- Défaut de fabrication

# 1. INTRODUCTION

## MÉCANIQUE de la RUPTURE

### Modes Fondamentaux



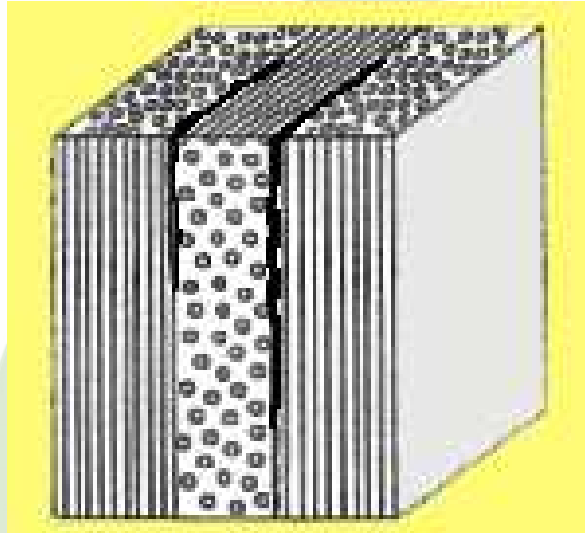
**MODE I**  
ouverture

**MODE II**  
Cisaillement plan

**MODE III**  
Cisaillement anti-plan

# 1. INTRODUCTION

## RUPTURE DES COMPOSITES STRATIFIES



### **Fissures interlaminaires :**

Fissures entre 2 couches dans un plan // aux couches de renfort.

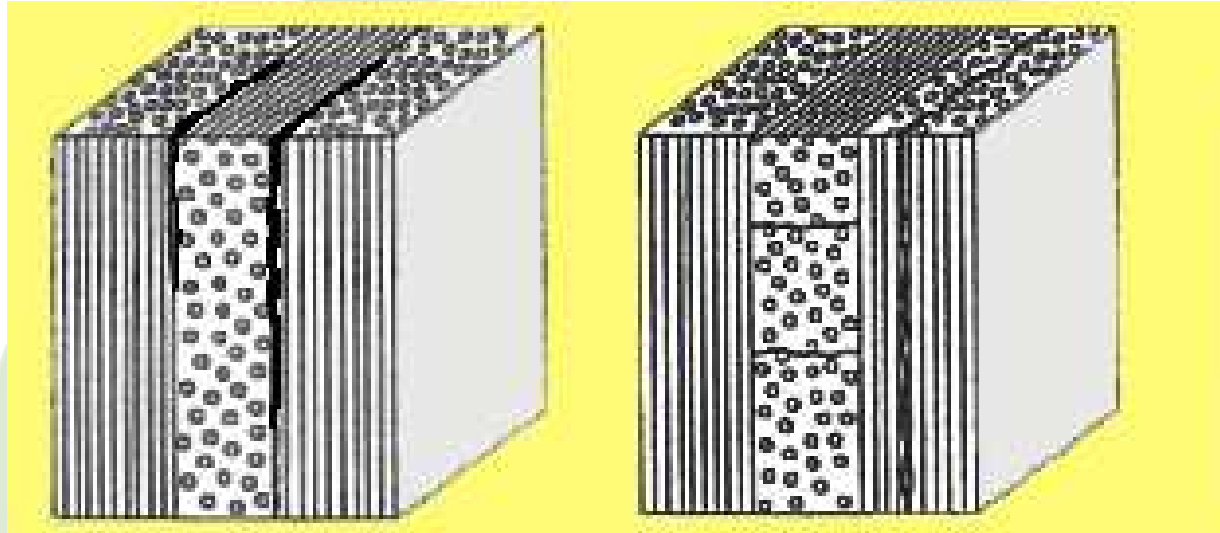
DELAMINAGES

Exemples :

- Essais en mode I, II,
- Essais de flexion appuis rapprochés

# 1. INTRODUCTION

## RUPTURE DES COMPOSITES STRATIFIES



### Fissures interlaminaires :

Fissures entre 2 couches dans un plan // aux couches de renfort.

DELAMINAGES

Exemples :

- Essais en mode I, II,
- Essais de flexion appuis rapprochés

### Fissures intralaminaires :

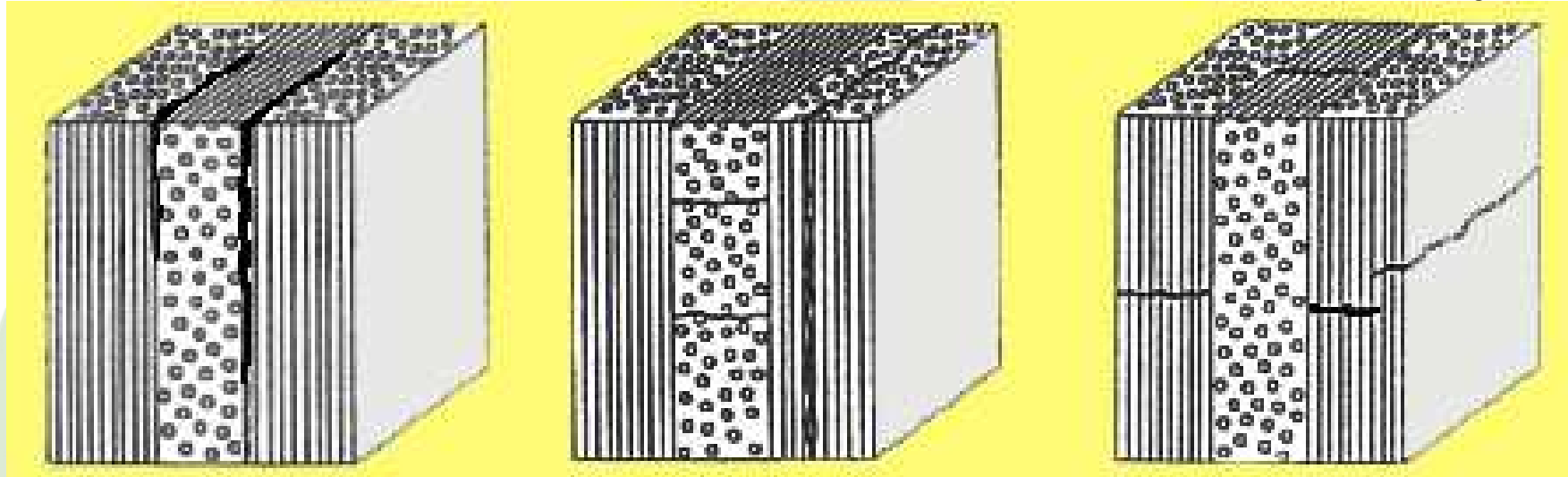
Fissures à l'intérieur des couches,  
⊥ ou // aux couches de renfort.

Exemples :

- Essais de traction transverse sur UD
- Essais de traction à  $\pm 45^\circ$

# 1. INTRODUCTION

## RUPTURE DES COMPOSITES STRATIFIES



### Fissures interlaminaires :

Fissures entre 2 couches dans un plan // aux couches de renfort.

DELAMINAGES

Exemples :

- Essais en mode I, II,
- Essais de flexion appuis rapprochés

### Fissures intralaminaires :

Fissures à l'intérieur des couches,  
⊥ ou // aux couches de renfort.

Exemples :

- Essais de traction transverse sur UD
- Essais de traction à  $\pm 45^\circ$

### Fissures translaminaires :

Fissures suivent un plan ⊥ aux couches et aux renforts.

Exemples :

Essais de traction ou compression uniaxiale dans le sens des fibres

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### DEMARCHE GENERALE

- Approche macroscopique

- Approche microscopique



Propagation



Amorçage

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### ANALYSE MACROSCOPIQUE

#### Observation visuelle ou à faible grossissement :

- Répartition des parties rompues
- Analyser les sens de propagation, les coalescences de fissures
- Identifier les zones d'amorçage

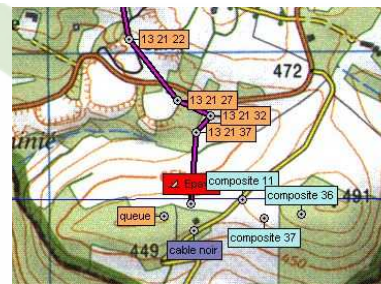
- 1) Identifier les mouvements globaux
- 2) Etablir un premier scénario de rupture



Pale d'éolienne



Accident d'hélicoptère



Effondrement d'une cuve

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

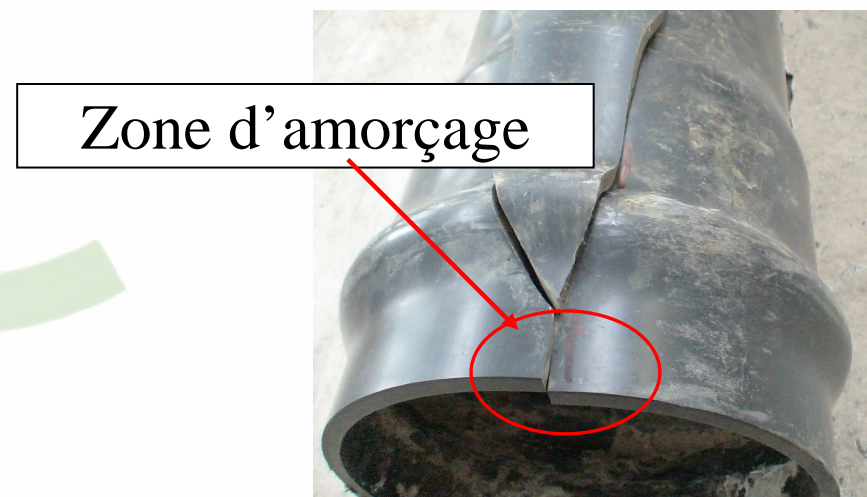
### ANALYSE MICROSCOPIQUE

#### Observation à fort grossissement :

- Choisir judicieusement les prélèvements
- Identifier les événements caractéristiques pour en déduire le mode de sollicitation local (flexion, traction, cisaillement, compression) :
  - Dimension de la zone d'amorçage,
  - Présence de craquelure, zone miroir, rupture en étoile, languettes, stries ...

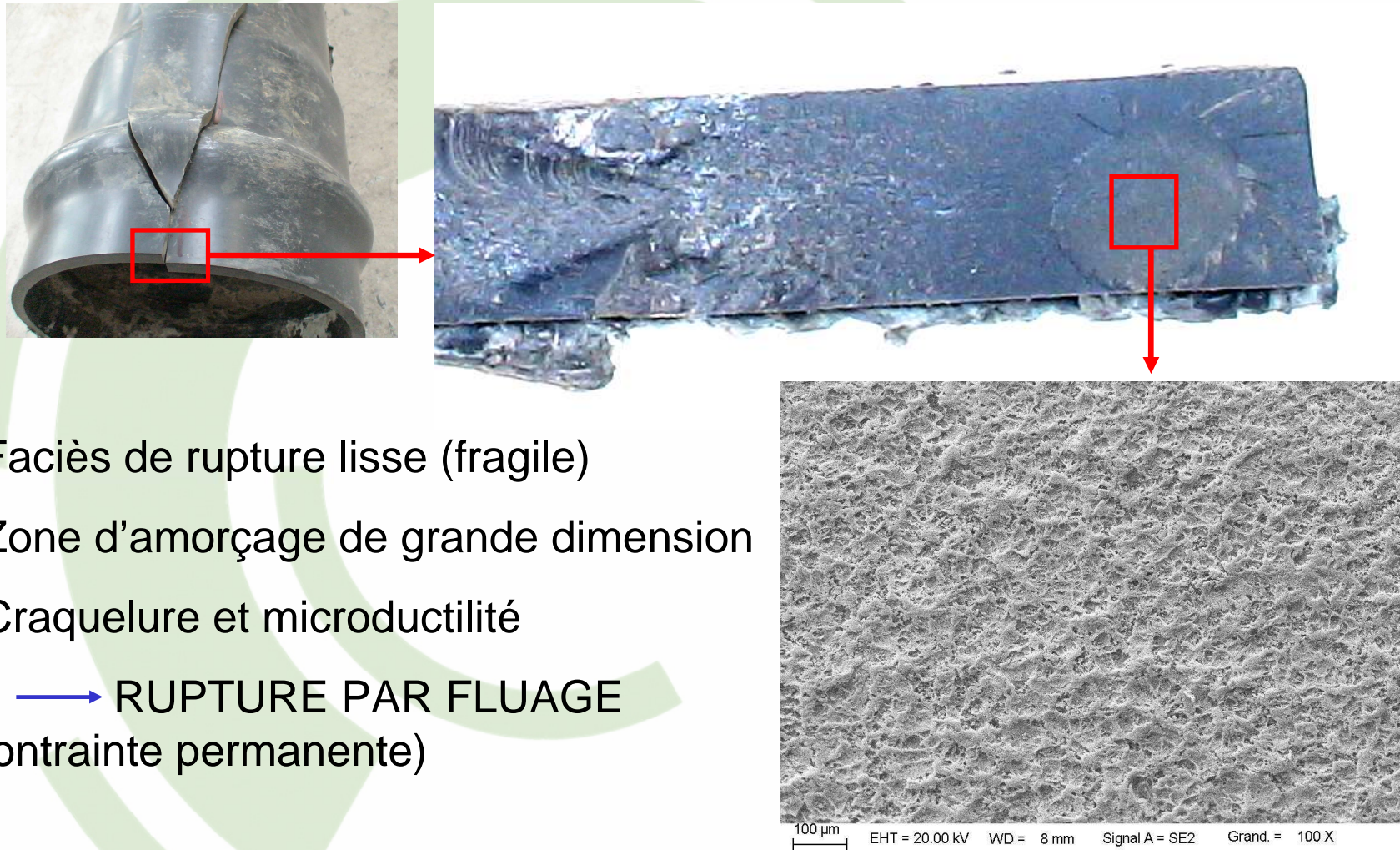
## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

Exemple : rupture d'une tuyauterie PVC de réseau d'incendie Page 13



## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

Exemple : rupture d'une tuyauterie PVC de réseau d'incendie Page 14



- Faciès de rupture lisse (fragile)
- Zone d'amorçage de grande dimension
- Craquelure et microductilité

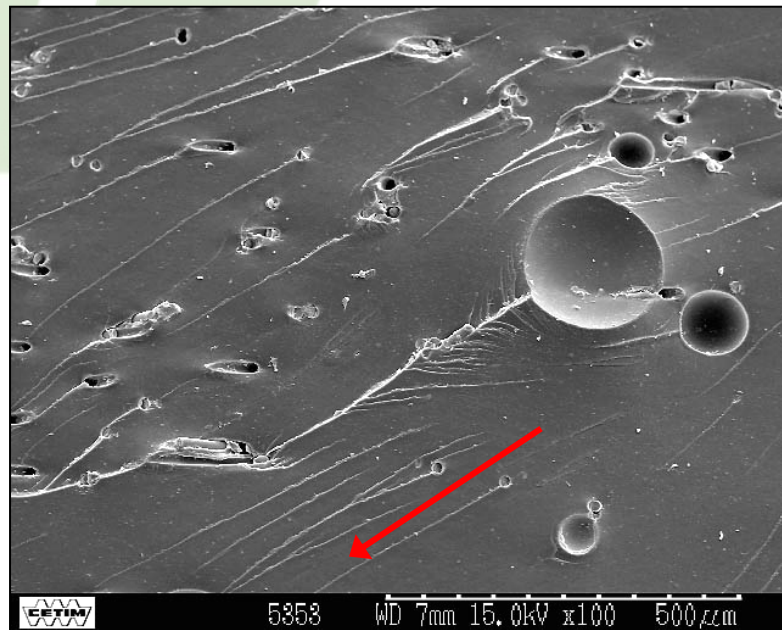
→ RUPTURE PAR FLUAGE  
(contrainte permanente)

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

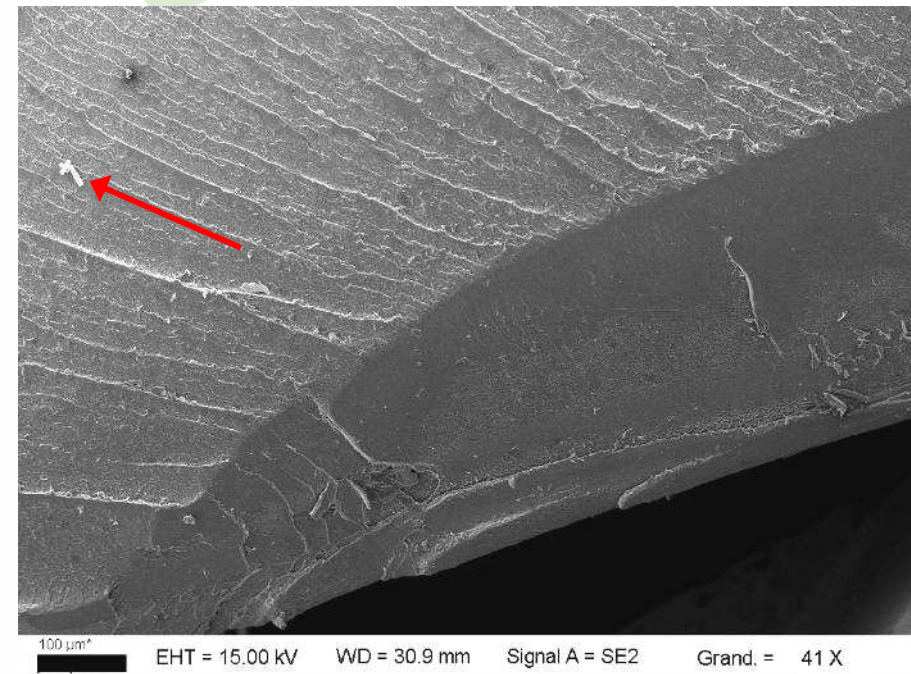
### PROPAGATION

#### Rivières

- Leur direction de confluence indique le sens local de propagation de la rupture.
- Elles résultent de la coalescence de microfissures qui se sont propagées dans des plans adjacents.
- Elles traduisent un comportement fragile du matériau.



**Vinylester**



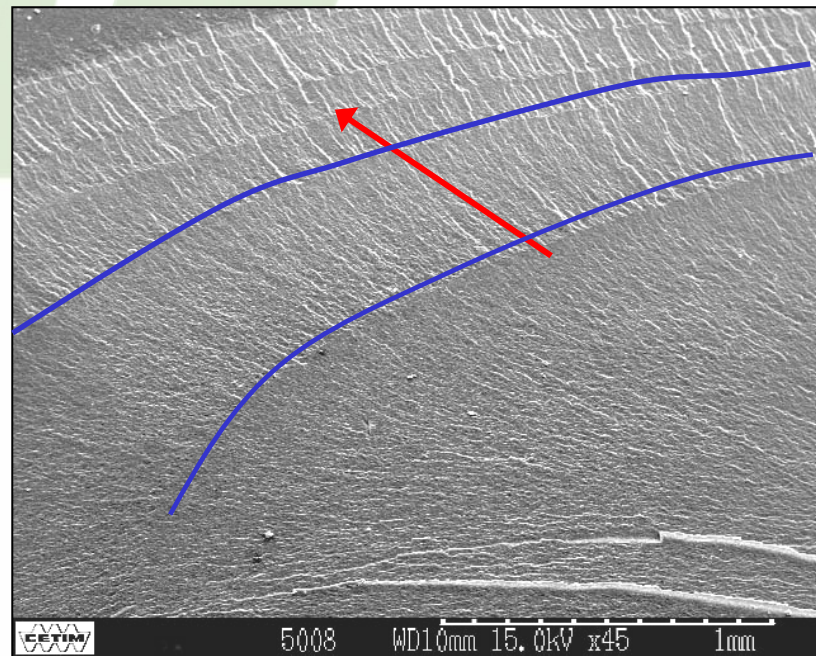
**PVC**

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### PROPAGATION

#### Lignes d'arrêts

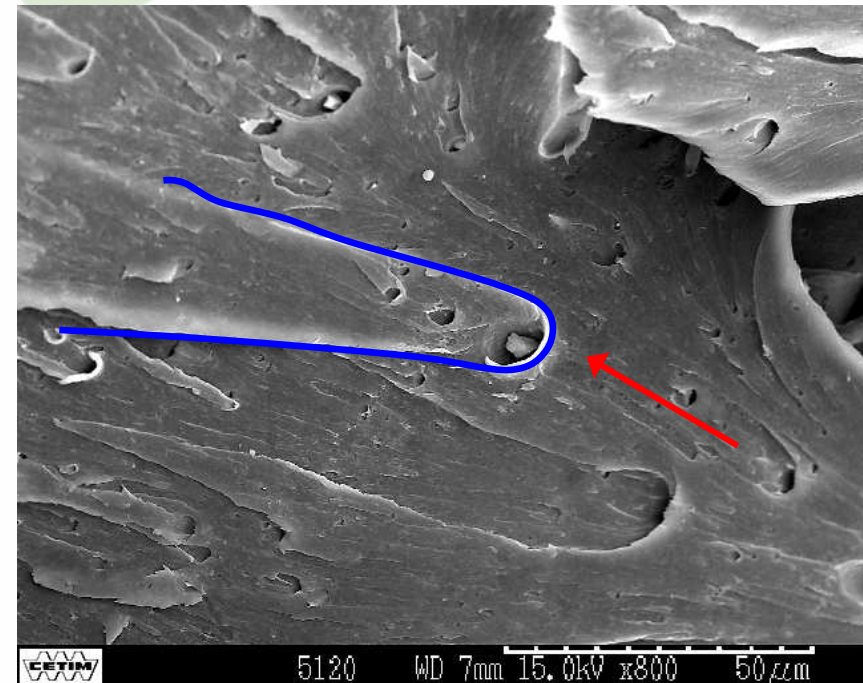
la fissure progresse plus ou moins rapidement et peut s'arrêter lorsque l'énergie n'est plus suffisante.



**Polyamide**

#### Paraboles

résultent de la rencontre d'une fissuration secondaire avec la fissuration principale. Les paraboles pointent vers la zone d'amorçage



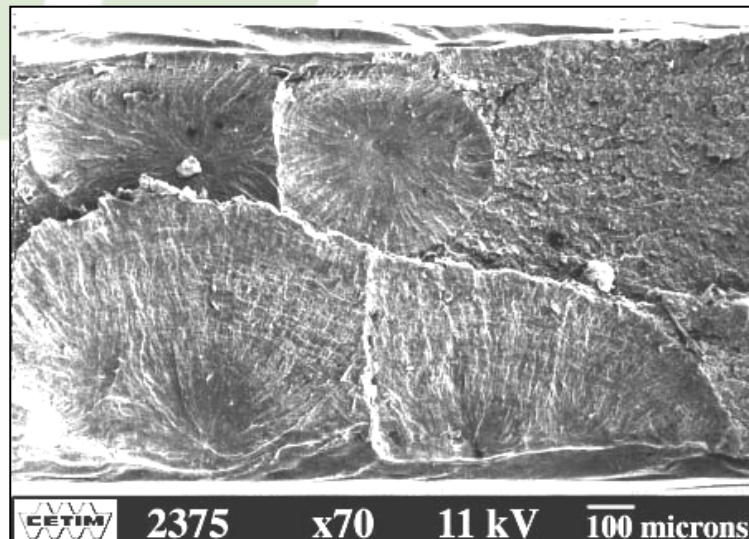
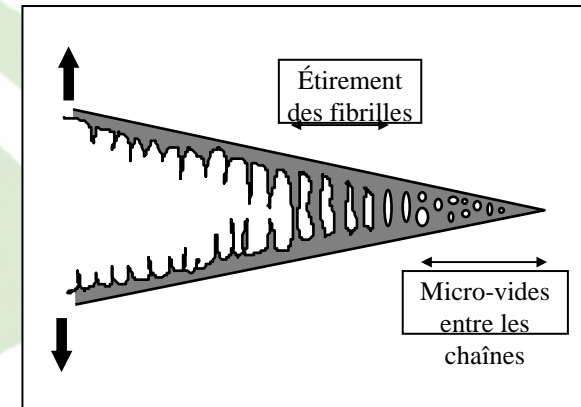
**Polycarbonate**

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

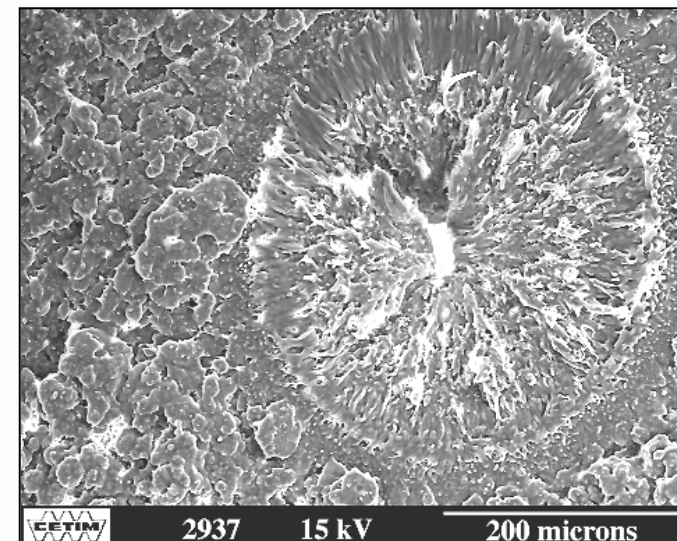
### AMORCAGE

#### Craquelure :

-sur le faciès, par une zone circulaire placée dans un plan perpendiculaire à l'axe de sollicitation (fibrilles blanches, blanchiment local)



Acétal



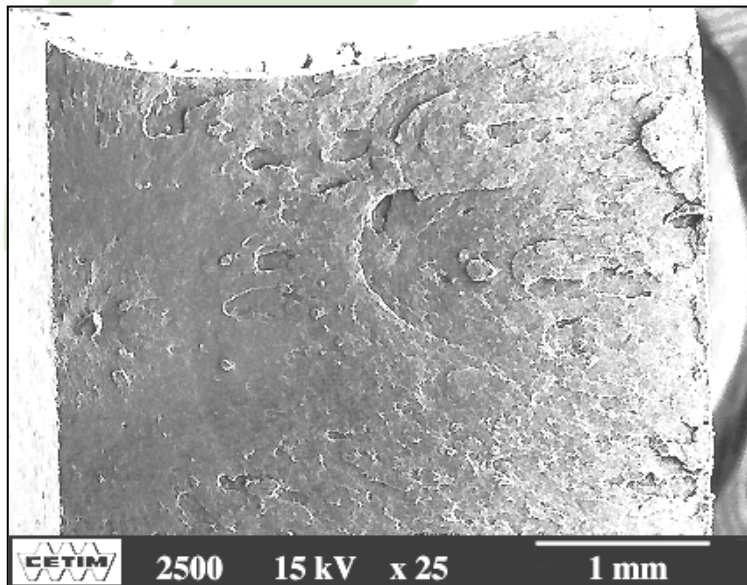
PVC

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### AMORCAGE

#### Zone miroir :

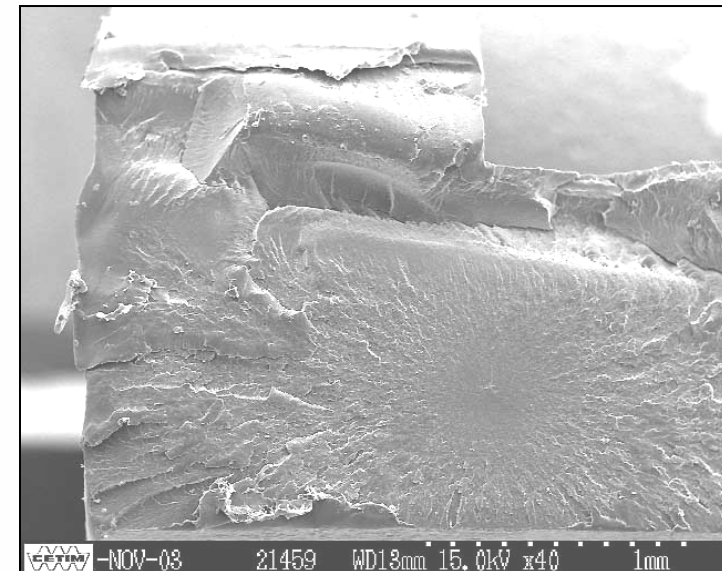
la zone d'amorçage se présente comme une zone miroir correspondant à une vitesse de fissuration plus faible



**EPDM**

#### Zone en étoile

l'endommagement est localisé dans une zone présentant un défaut.



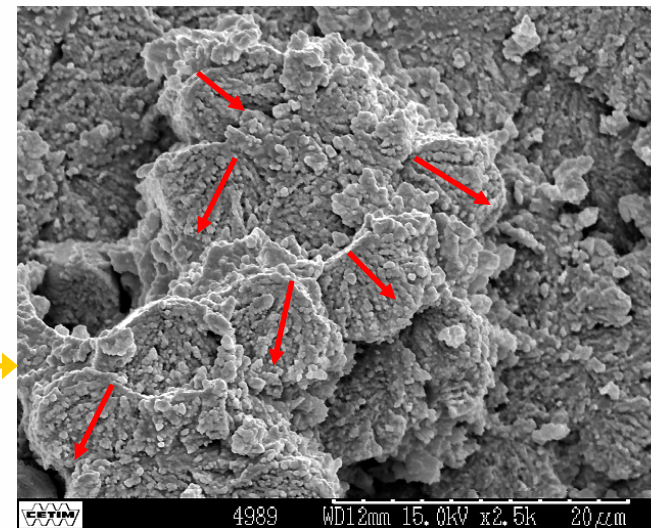
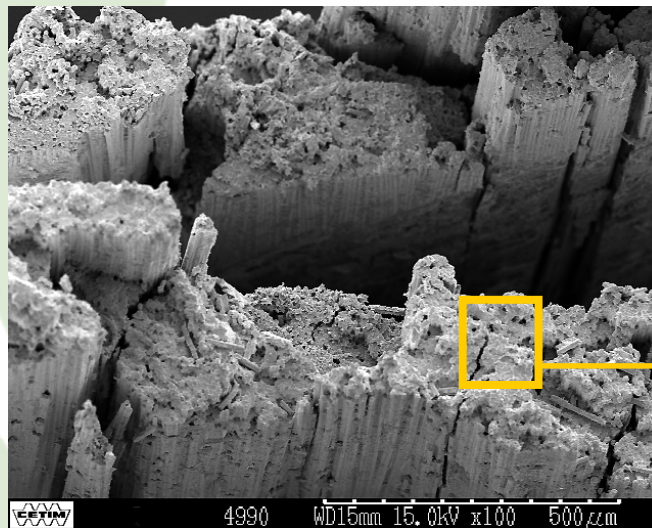
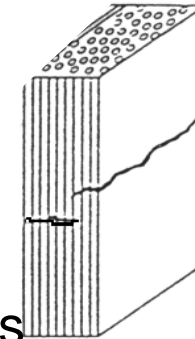
**PA**

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### MODE DE RUPTURE

#### Rupture statique translaminaire en traction

- Rupture en paquet de fibres,
- Rupture fragile
- Analyse statistique des ruptures de fibres individuelles indique le sens de propagation (rivières, zone miroir)



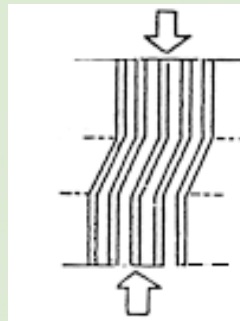
Carbone-epoxyde [0°]

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### MODE DE RUPTURE

#### Rupture statique translaminaire en compression

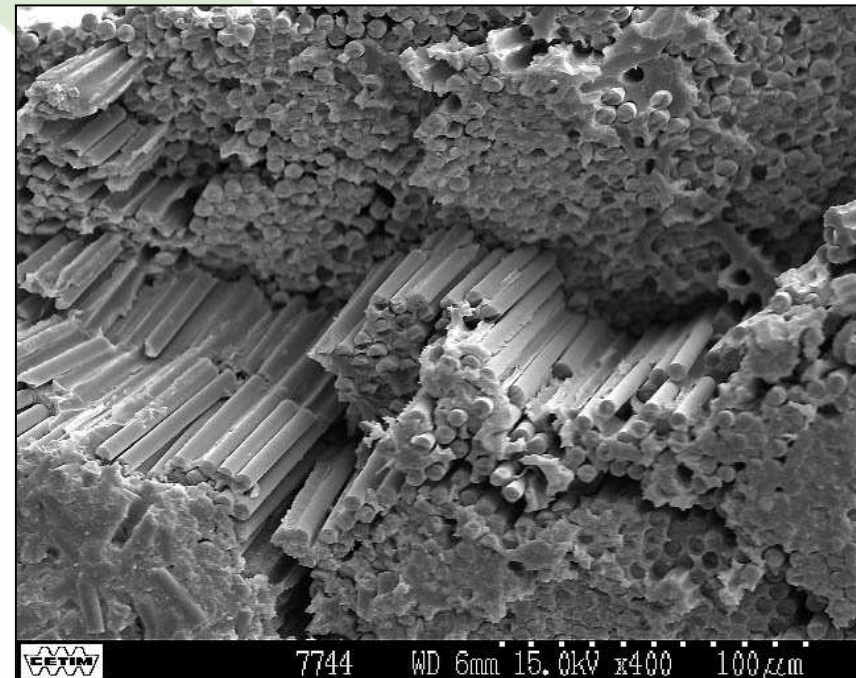
Cisaillement de plusieurs fibres



Bande de cisaillement d'une dizaine de diamètre de fibres (faciès en escalier)

Rupture de fibres à l'échelle micro :

- par cisaillement et abrasion
- par flexion



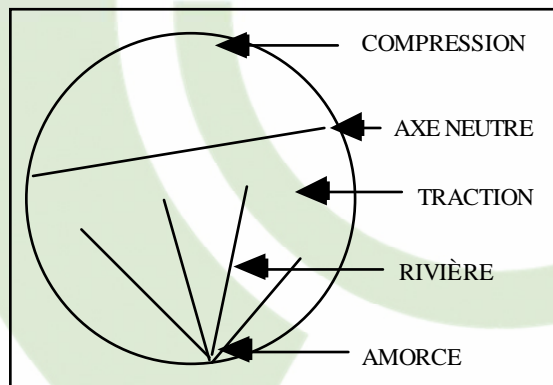
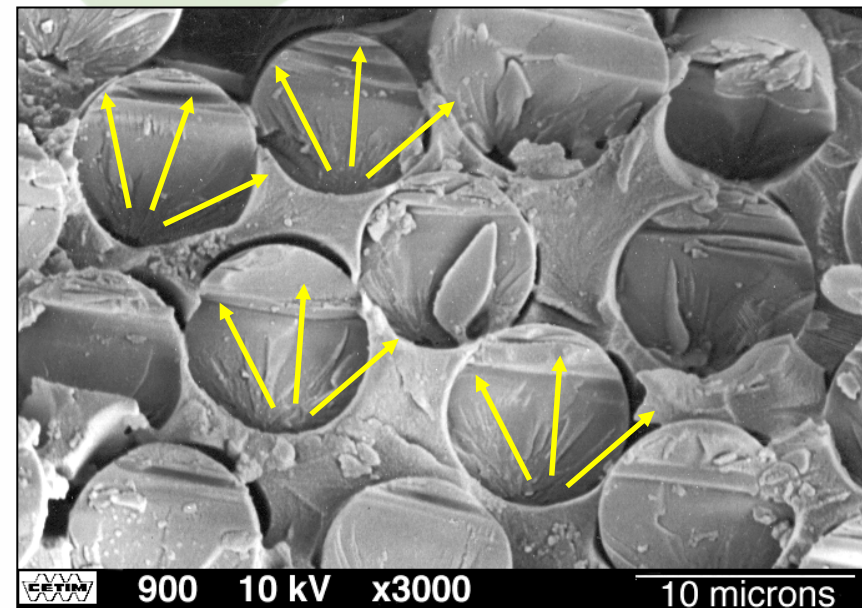
## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### MODE DE RUPTURE

#### Rupture statique translaminaire en compression



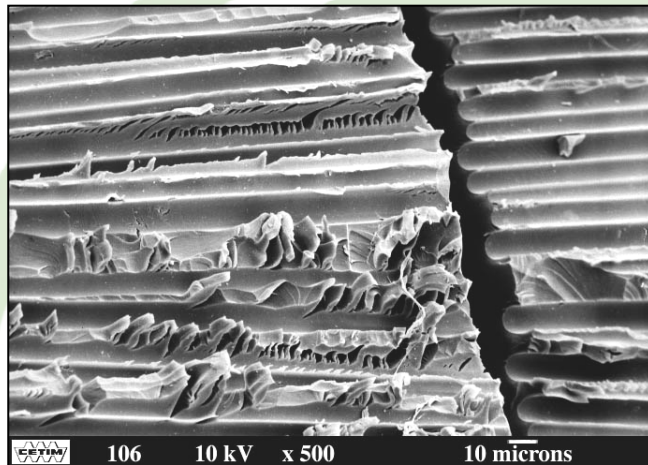
Rupture de fibres par flexion



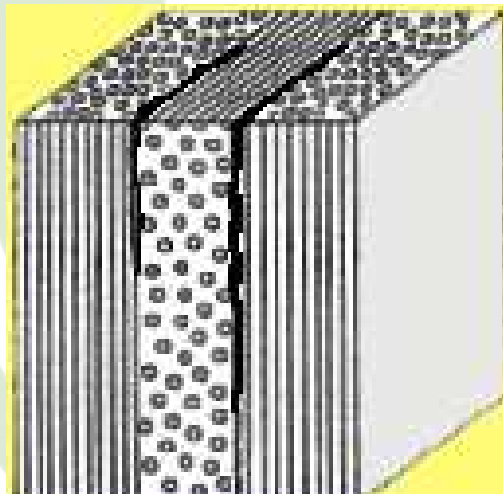
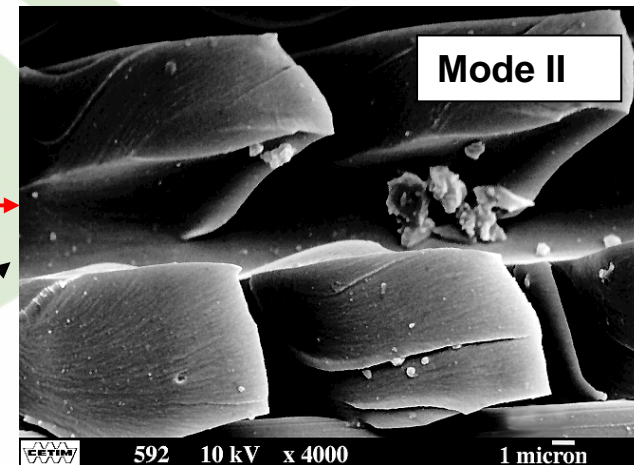
## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### MODE DE RUPTURE

#### Rupture statique interlaminaire



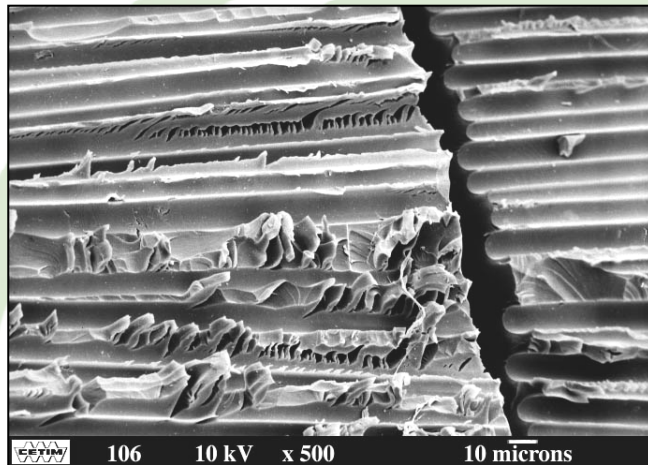
Languettes  
inclinées à 45°



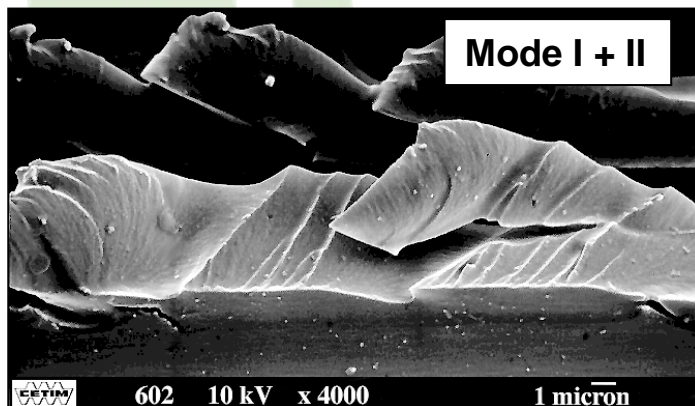
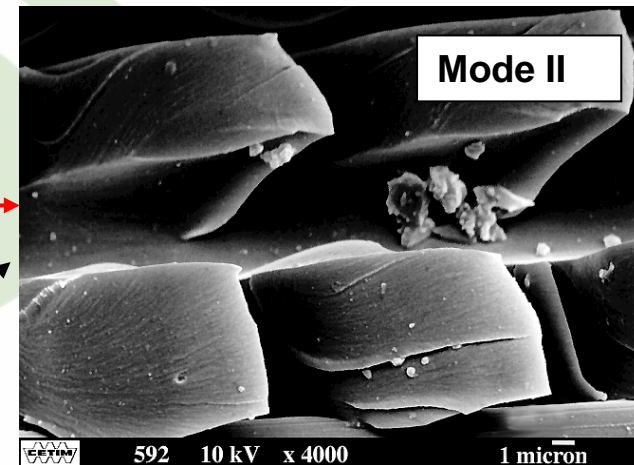
## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### MODE DE RUPTURE

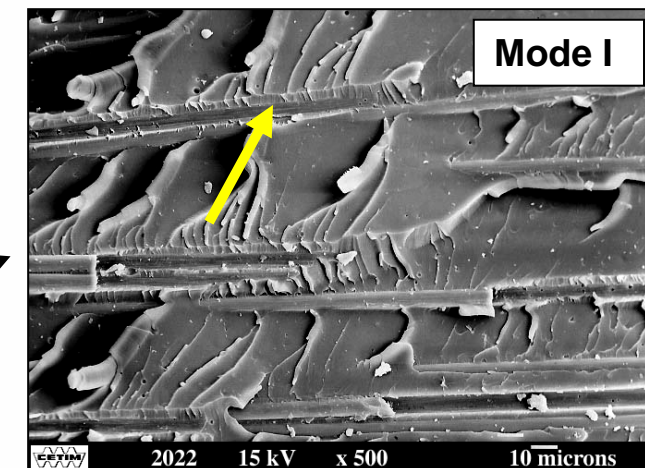
#### Rupture statique interlaminaire



Languettes  
inclinées à 45°



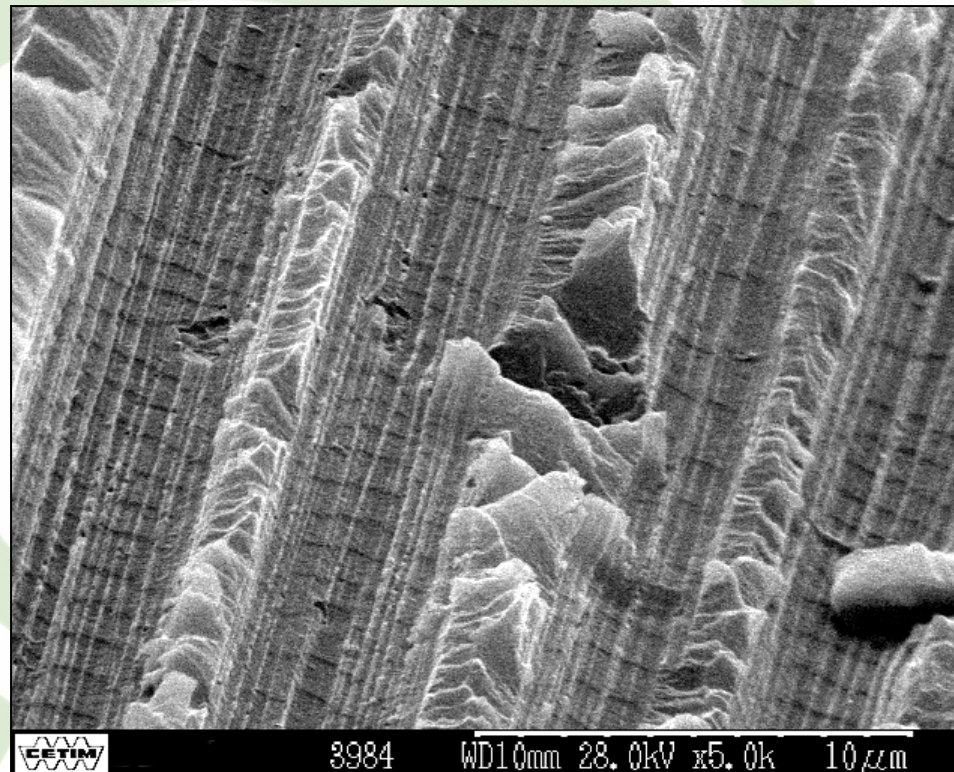
rivières



## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### MODE DE RUPTURE

#### Rupture par fatigue : effet mécanique



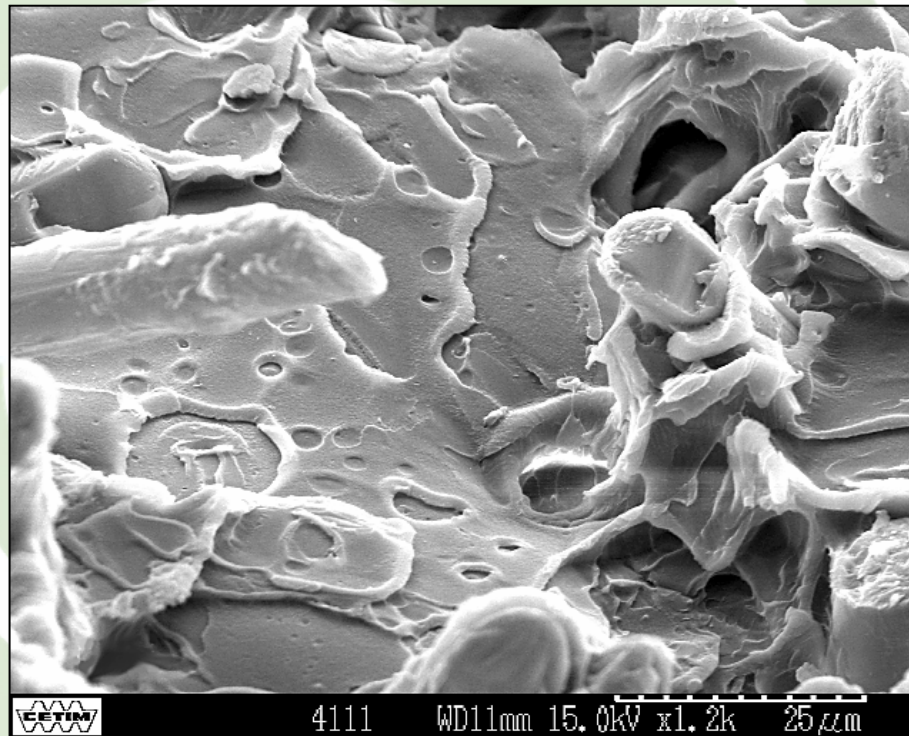
Carbone - Époxyde [0°]

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### MODE DE RUPTURE

Rupture par fatigue : effet thermique (cuvettes, signe de fusion locale)

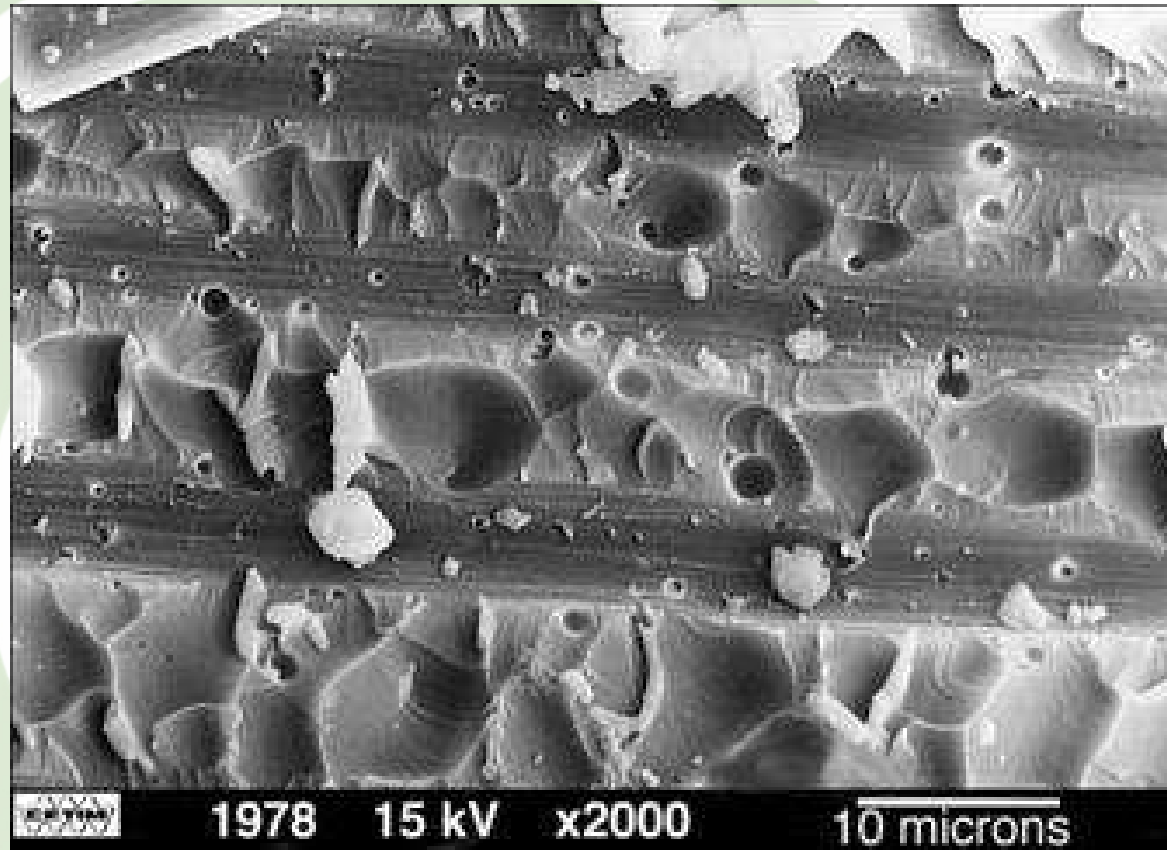
fréquence de sollicitation élevée



**Verre - PEI**

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

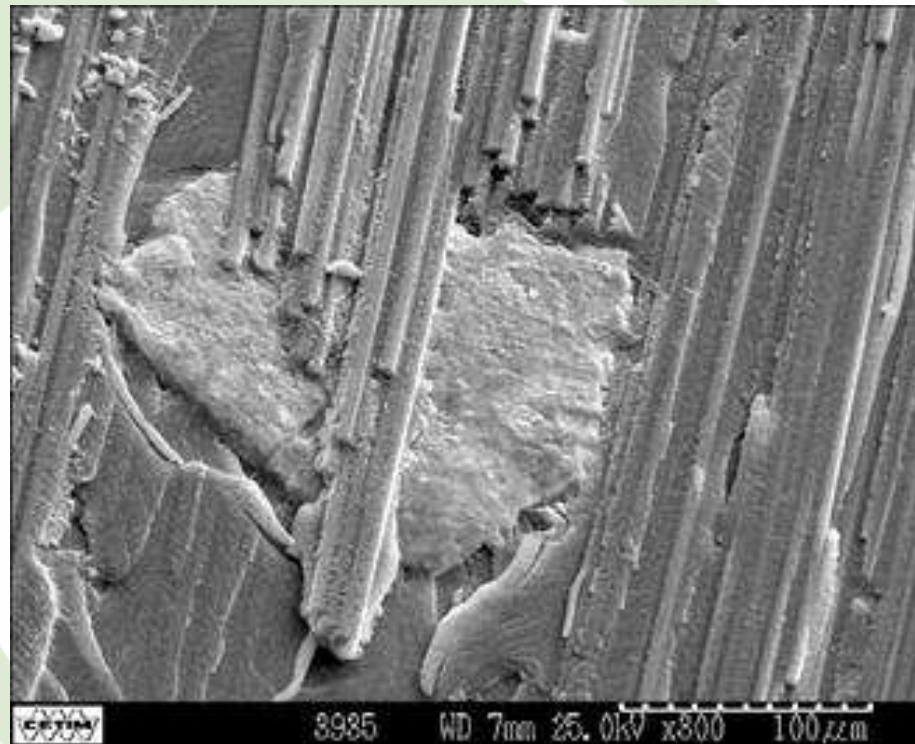
### DEFAUTS DE FABRICATION



Matériaux Carbone-Époxyde [0°]  
Microporosité généralisée mise à jour au  
niveau d'un délaminage

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

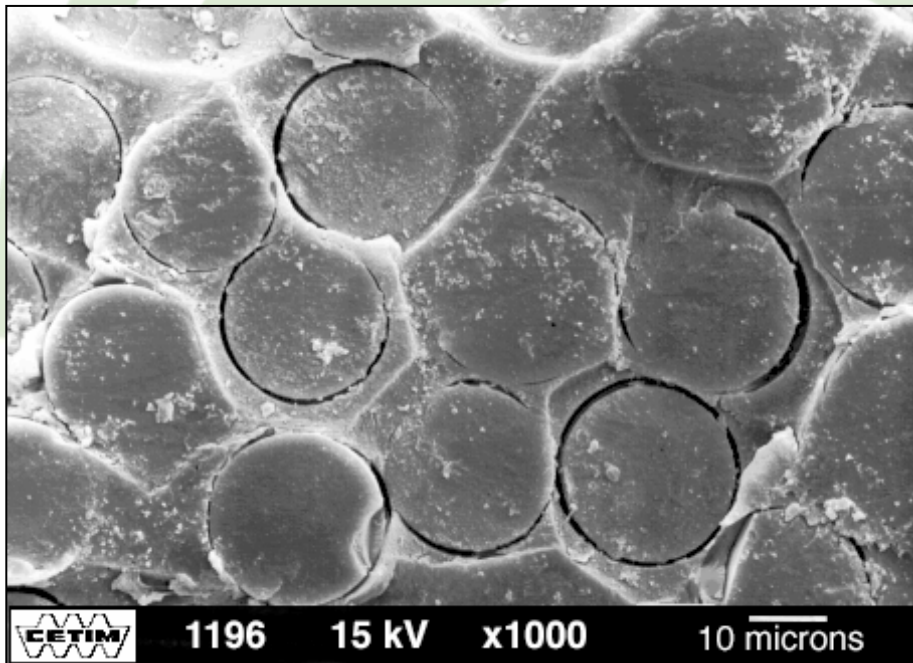
### DEFAUTS DE FABRICATION



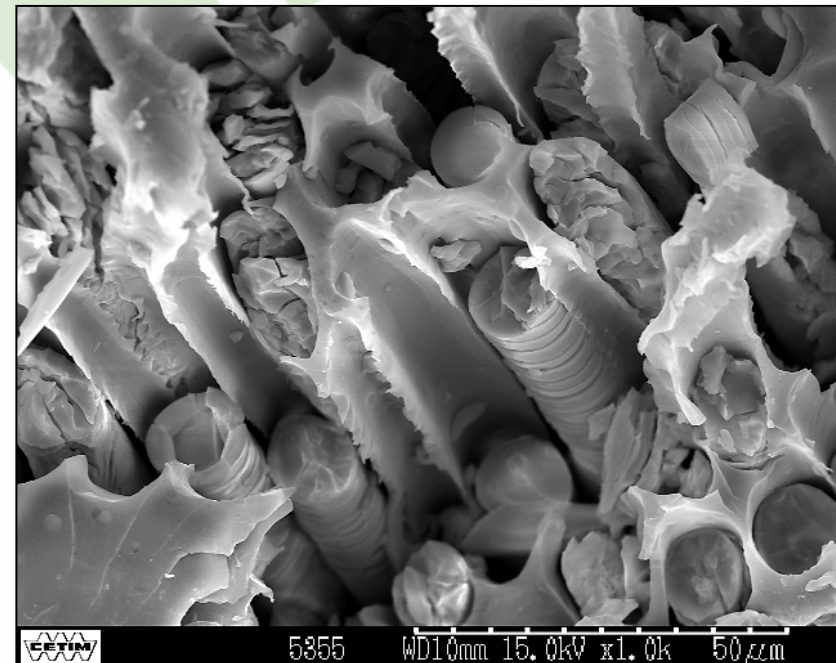
Inclusion mise en évidence au niveau  
d'un délaminage

## 2. DEMARCHE ET ANALYSE

### ATTAQUE CHIMIQUE



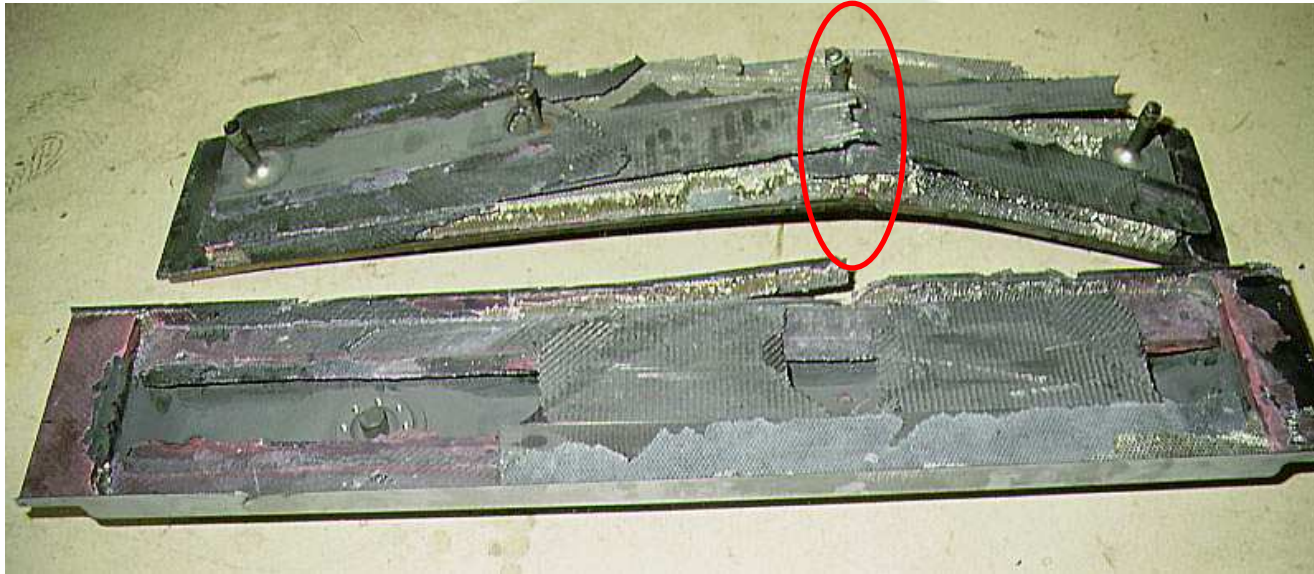
**Cuve Verre - Polyester**



**Tuyauterie Verre - Vinlyester**

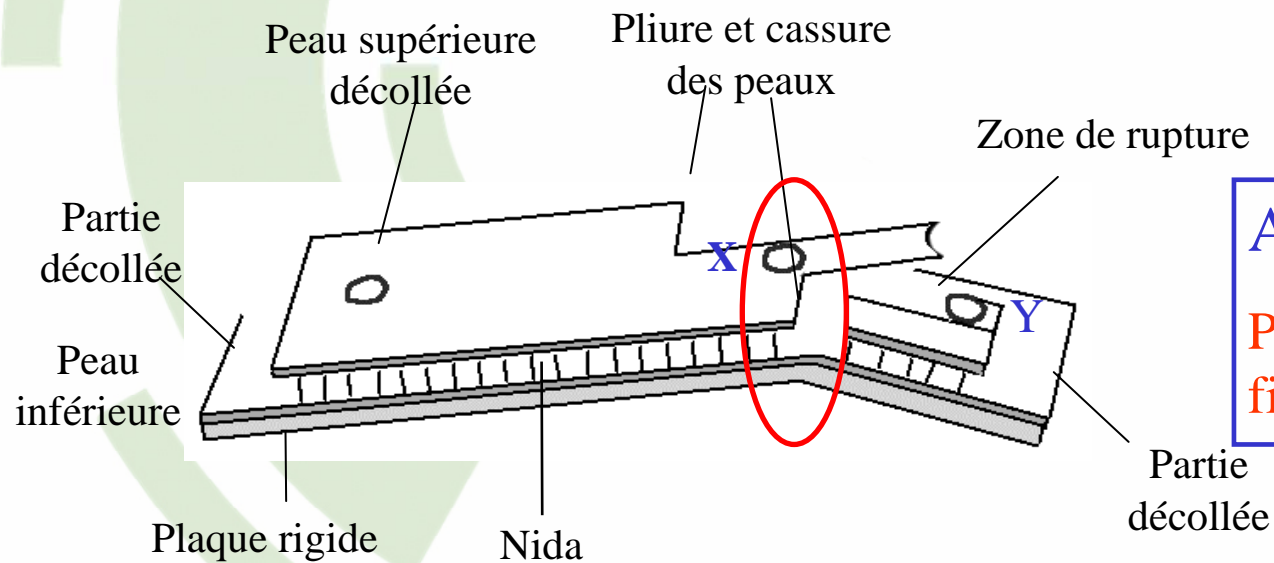


### 3. ETUDE DE CAS : POUTRE COMPOSITE



Pièce sandwich  
rattachée à un  
équipement complexe  
par plusieurs points de  
fixations :

Peaux stratifiées en  
C / Epoxyde  
multidirectionnels

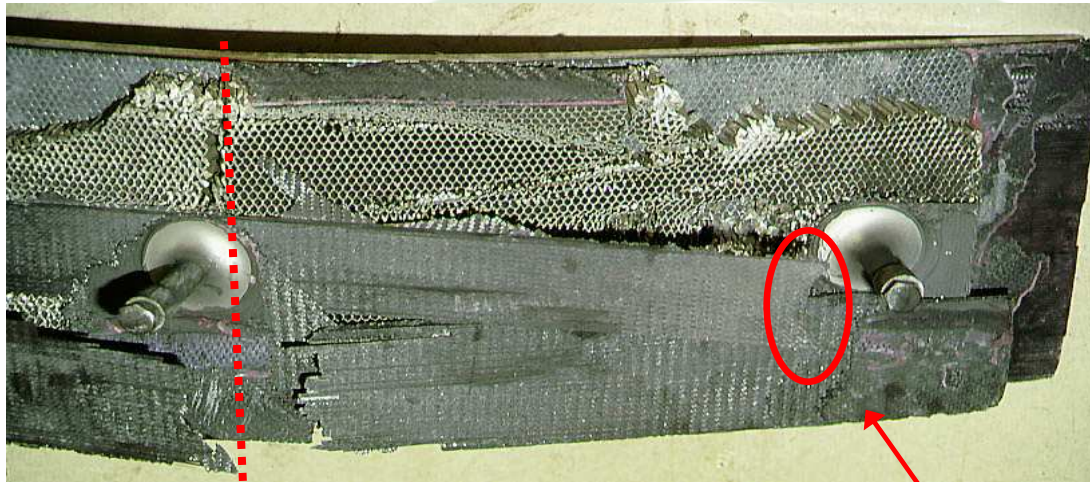


**APPROCHE MACRO**

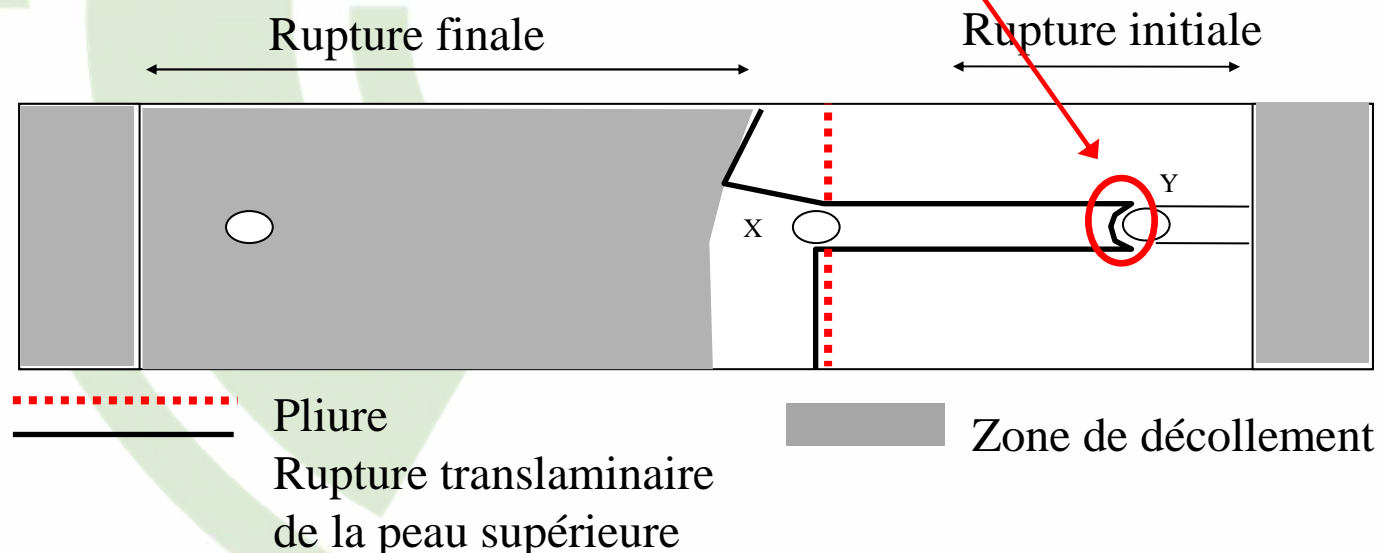
Pliure au niveau du point de fixation X

### 3. ETUDE DE CAS : POUTRE COMPOSITE

#### APPROCHE MACRO



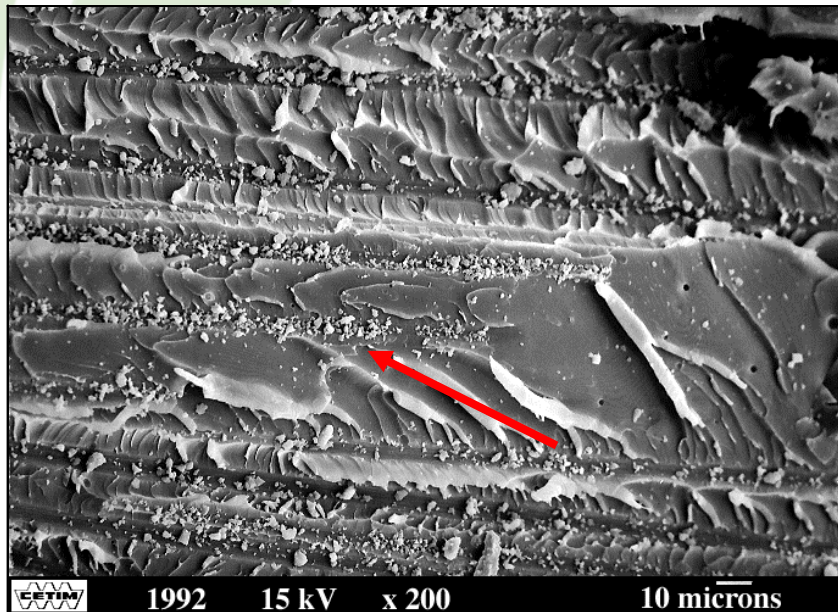
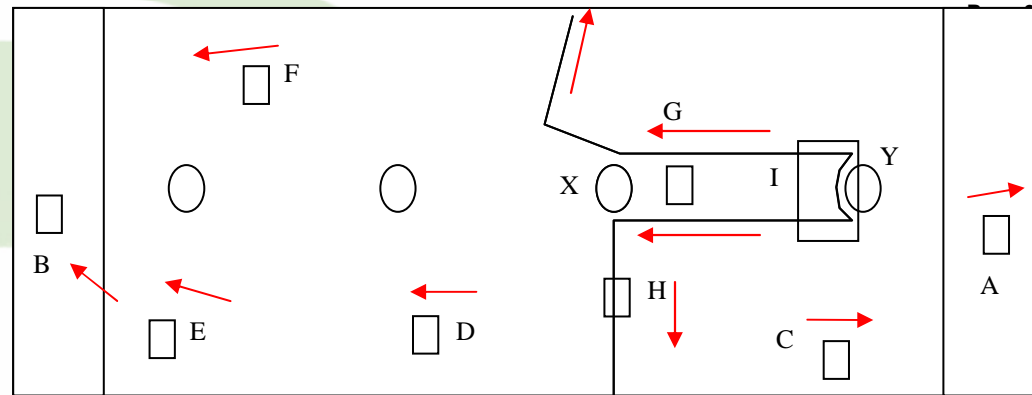
- pas de défaut de collage
- pliure au niveau du point de fixation X
- décollement de part et d'autre d'une zone de rupture translaminaire
- découpe parfaite autour d'Y



### 3. ETUDE DE CAS : POUTRE COMPOSITE



**APPROCHE MICRO :**  
**SENS DE PROPAGATION**



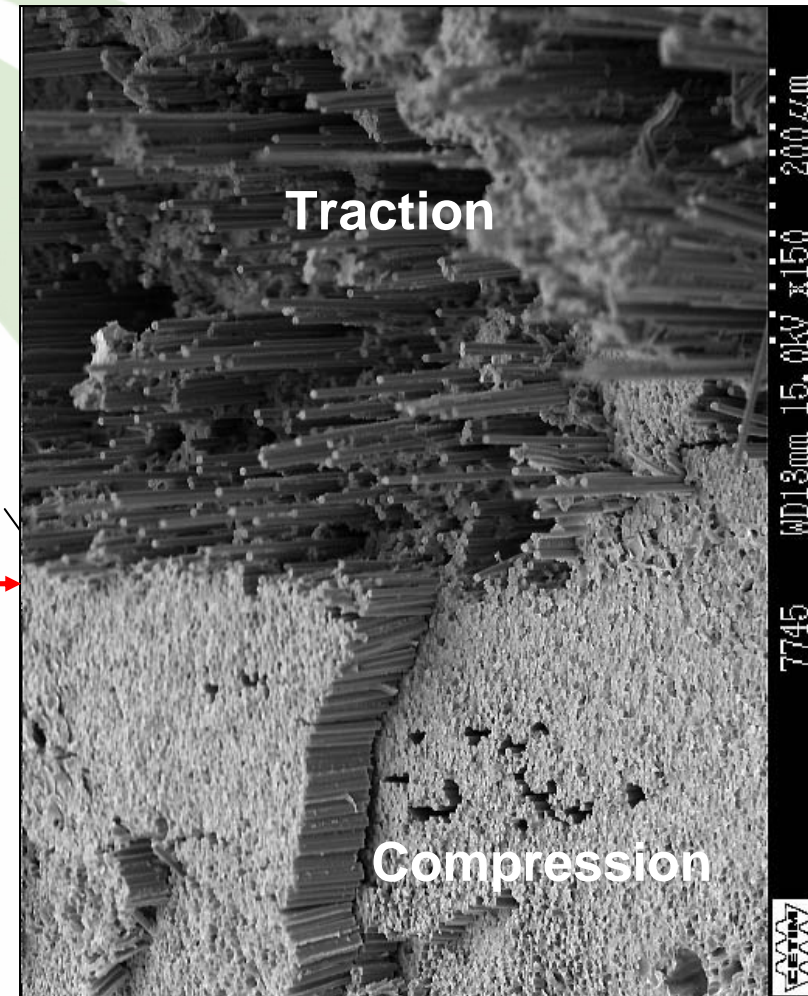
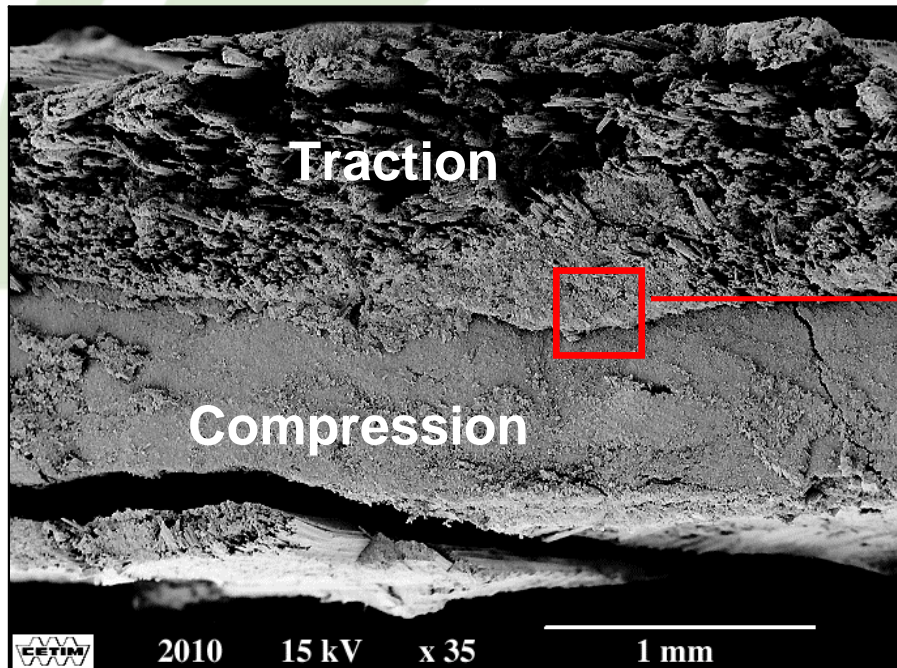
**Prél. E**  
**Rupture interlaminaire en Mode I**  
**Propagation de droite à gauche**

### 3. ETUDE DE CAS : POUTRE COMPOSITE

#### APPROCHE MICRO :

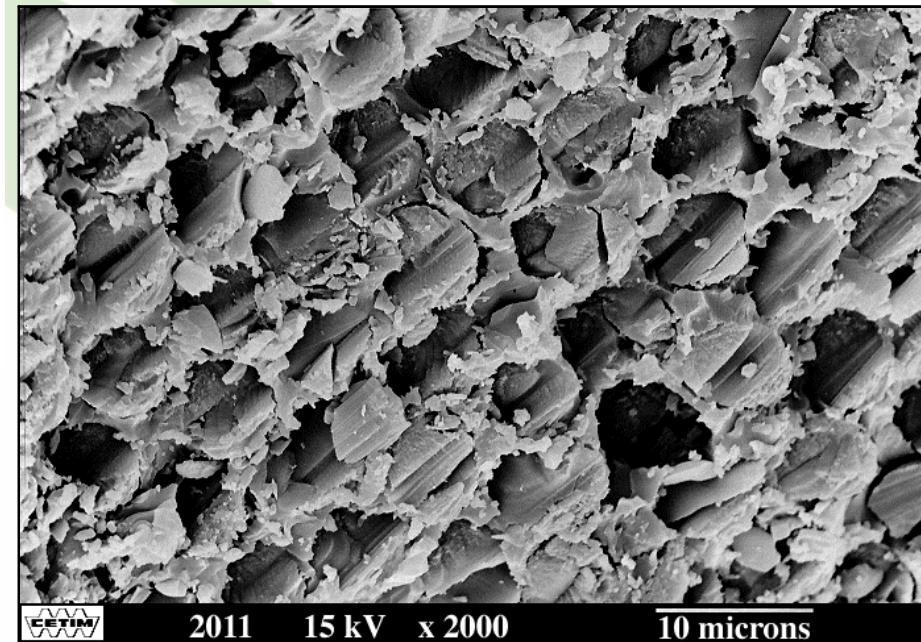
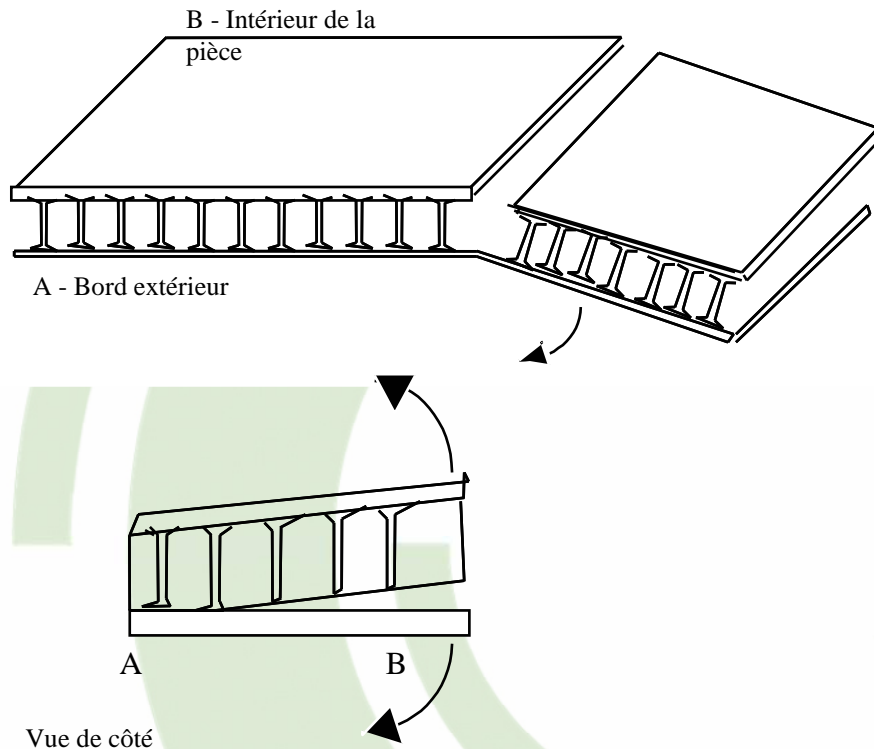
Prél. H : zone de pliure

Rupture translaminaire par flexion  
de la peau supérieure de la pièce



### 3. ETUDE DE CAS : POUTRE COMPOSITE

#### APPROCHE MICRO :

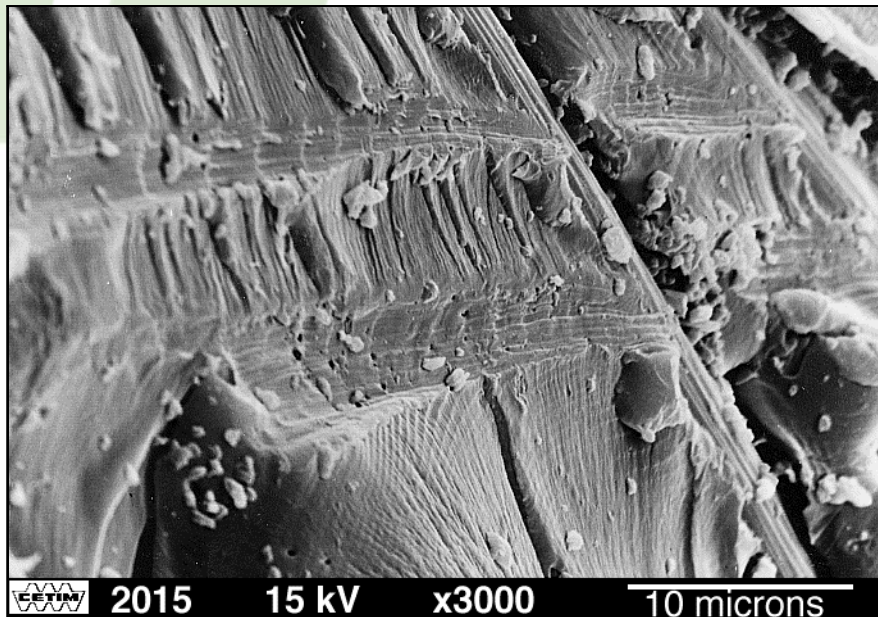
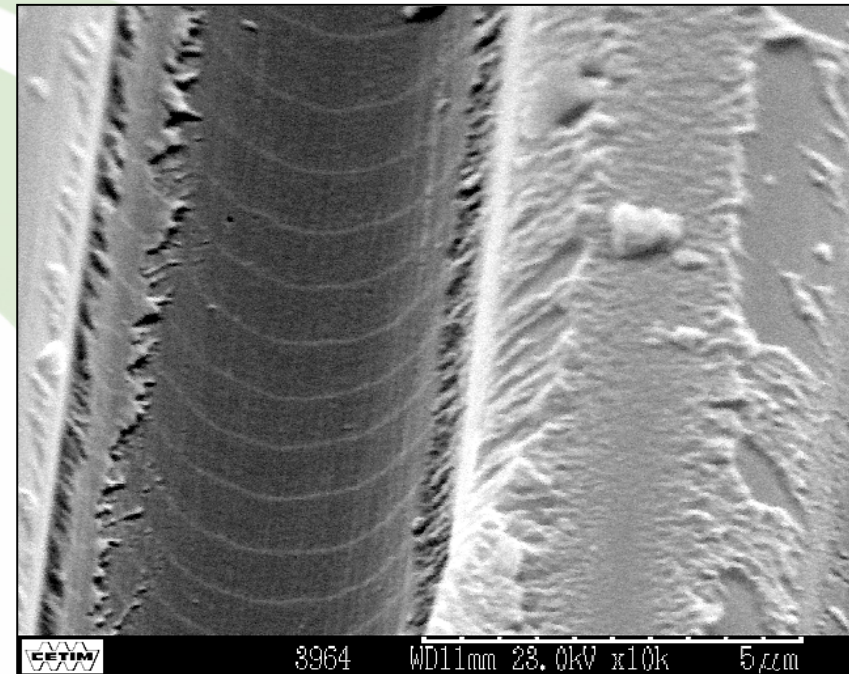
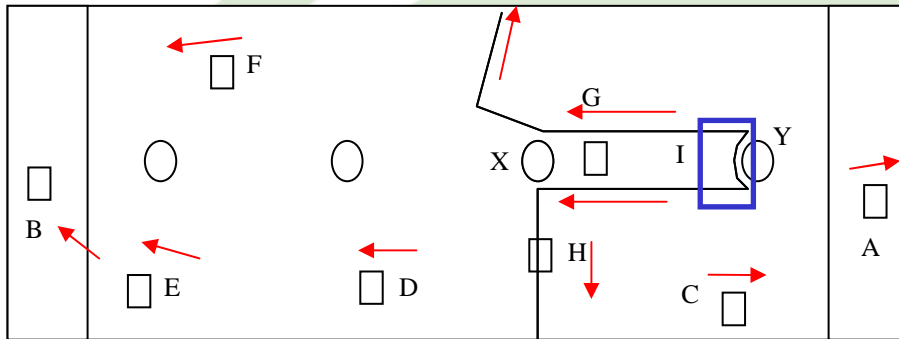


**Détail de la partie de la peau rompue en compression**  
**Chaque fibre présente un axe neutre incliné par rapport aux parois de la peau**

**FLEXION LONGITUDINALE ET TRANSVERSALE**

### 3. ETUDE DE CAS : POUTRE COMPOSITE

#### APPROCHE MICRO :



**Stries de fatigue dans la matrice et les empreintes de fibre**

**Rupture interlaminaire par fatigue entre les mèches à ± 45°**

## 4. CONCLUSIONS - SYNTHÈSE

### Capitalisation en interne :

- Prestations ADE
- Actions R&D : Essais mécaniques à différentes vitesses de sollicitation puis observations

bases de données



### Limites actuelles / Etudes en cours :

- Polymères thermoplastiques amorphes : fatigue ou rupture statique (stries ou lignes d'arrêt...)
- Matériaux très renforcés en fibres et charges minérales : peu d'indications dans la matrice
- Peu de recul sur les composites

### Corrélations Calculs / Fractographie :

- Valider les sollicitations et zones les plus contraintes dans les structures composites
- Evaluer de façon quantitative les efforts à rupture (exemple : fluage) : problème d'utilisation ou de conception ?

**MERCI DE VOTRE ATTENTION**

-  
**QUESTIONS**  
-

**Benoit.poitou@cetim.fr**

**Tel : 02.40.37.36.52**

**CETIM - NANTES**

**INGENIERIE DES POLYMERES ET COMPOSITES (IPC)**

**ANALYSE DE DEFAILLANCE ET EXPERTISE (ADE)**